

**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**

**FAKULTA STROJNÍ**

Katedra strojírenské technologie



Obor 2303V002

zaměření - svařování

**SVAŘOVÁNÍ DLOUHOVLÁKNOVÝCH PP**

**KOMPOZITŮ ULTRAZVUKEM**

**ULTRASONIC WELDING OF THE LONG-FIBRES PP  
COMPOSITES**

**[ Doktorská disertační práce ]**

Autorka: Ing. Lenka Frajtová

Školitelka: Prof. Ing. Iva Nová, CSc.

Vedoucí katedry: Prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld

Liberec, 2009

## Anotace

### *Téma práce:* **Svařování dlouhvláknových PP kompozitů ultrazvukem**

Disertační práce se zabývá problematikou vlivu technologických parametrů ultrazvukového svařování na pevnost svarového spoje materiálů z dlouhvláknových kompozitů s termoplastickou matricí. Jako základní termoplastická matrice je použit polypropylen a to v podobě kopolymeru plněného dlouhými skelnými vlákny. Pro porovnání pevností svarových spojů je použit i neplněný polypropylen kopolymer. V teoretické části je proveden rozbor procesu ultrazvukového svařování, vliv jednotlivých svařovacích parametrů na pevnost svarových spojů. V experimentální části je na vstřikovaných zkušebních vzorcích tvaru tyčinek hodnocen vliv jednotlivých svařovacích parametrů na pevnost svarového spoje. Pro hodnocení jednotlivých materiálů a parametrů ultrazvukového svařování byla vybrána statistická analýza – metoda plánovaného experimentu (DOE – Design of Experiments podle Taguchiho).

*Klíčová slova:* ultrazvukové svařování, skelná vlákna, polypropylen, analýza DOE

## Annotation

### *Theme of the work:* **Ultrasonic welding of the long - fibers PP composites**

Dissertation work deals with problems of the influence of the ultrasonic welding technological parameters on strength of the weld bond of materials from long - fibers composites with thermoplastic matrix. Polypropylene namely in form of the copolymer stuffed with long glass fibers is used as the basic thermoplastic matrix. An unfilled polypropylene copolymer is used for comparing of the strength of the weld bonds, too. In the theoretical part, the analysis of the process of ultrasonic welding and influence of the individual welding parameters on the strength of the weld bonds are performed. In the experimental part, an influence of the individual welding parameters on the strength of the weld bond is evaluated on the injected test samples which are stick shaped. The statistic analysis – method of the planned experiment (DOE – Design of Experiments after Taguchi) was selected for evaluation of the individual materials and parameters of the ultrasonic welding.

*Keywords:* ultrasonic welding, polypropylene, glass fibres, DOE statistic analysis

## **Poděkování**

Děkuji všem, kteří mi poskytli cenné rady a připomínky při vypracování mé disertační práce, zejména pak mé školitelce prof. Ing. Ivě Nové, CSc., prof. Dr. Ing. Petru Lenfeldovi za cenné připomínky při řešení doktorské práce, dále Ing. Zdeňkovi Hudcovi, Ph.D., Ing. Pavlovi Doubkovi, Ph.D., Ing. Pavlovi Solfronkovi, Ph.D. a Ing. Martinovi Seidlovi za pomoc při vyhodnocování experimentů.

Dále bych ráda poděkovala mé rodině za trpělivost a podporu během celého mého doktorského studia.

V Liberci, 30. 10. 2009

Lenka Frajtová



## OBSAH

<b>Seznam použitých zkratk a symbolů .....</b>	<b>6</b>
<b>1. ÚVOD .....</b>	<b>9</b>
<b>1.1 Historie ultrazvukového svařování plastů .....</b>	<b>10</b>
<b>1.2 Cíle disertační práce.....</b>	<b>11</b>
<b>1.3 Přehled publikací k dané problematice.....</b>	<b>12</b>
<b>2. ULTRAZVUK A ULTRAZVUKOVÉ SVAŘOVÁNÍ PLASTŮ .....</b>	<b>13</b>
<b>2.1 Fyzikální základy ultrazvuku.....</b>	<b>13</b>
2.1.1 Vznik ultrazvukových vln .....	14
2.1.2 Druhy vlnění.....	16
2.1.3 Odraz a lom ultrazvukových vln .....	17
2.1.4 Tlumení a absorpce vlnění .....	18
2.1.5 Energetické vlastnosti ultrazvukového pole.....	18
2.1.5.1 Akustický tlak .....	19
2.1.5.2 Energie ultrazvukového vlnění.....	19
2.1.5.3 Intenzita ultrazvukového pole .....	19
2.1.5.4 Akustický výkon .....	20
<b>2.2 Svařování ultrazvukem.....</b>	<b>21</b>
2.2.1 Proces svařování.....	21
2.2.2 Ultrazvukový svařovací systém .....	23
2.2.2.1 Generátor.....	25
2.2.2.2 Měnič (konvertor, transducer).....	25
2.2.2.3 Booster .....	26
2.2.2.4 Sonotroda .....	27
2.2.3 Kontaktní plochy svařovaných dílů.....	29
2.2.3.1 Svarové spoje s usměrňovačem energie.....	31
2.2.4 Fixační přípravek.....	33
2.2.5 Svařování v blízkém a dalekém poli .....	35
<b>2.3 Hlavní parametry ultrazvukového svařování.....</b>	<b>36</b>
2.3.1 Svařovací čas $t_{sv}$ a čas chlazení $t_{ch}$ .....	36
2.3.2 Amplituda a přítláčná síla .....	36
2.3.3 Frekvence .....	38
<b>3. CHARAKTERISTIKA PLASTŮ POUŽITÝCH PRO SVAŘOVÁNÍ     ULTRAZVUKEM.....</b>	<b>39</b>
<b>3.1 Svařitelnost plastů .....</b>	<b>39</b>
<b>3.2 Vliv faktorů na svařitelnost plastů ultrazvukem.....</b>	<b>39</b>
3.2.1 Struktura .....	39
3.2.2 Molekulová hmotnost.....	43
3.2.3 Stabilita ve fázi tání.....	43
<b>3.3 Plasty vhodné pro svařování ultrazvukem.....</b>	<b>43</b>



<b>3.4 Vlastnosti tavenin plastů.....</b>	<b>45</b>
3.4.1 Pohyb makromolekul .....	45
3.4.2 Tok polymerních tavenin .....	45
<b>3.5 Polymerní vláknové kompozity .....</b>	<b>47</b>
3.5.1 Plniva.....	50
3.5.2 Vláknitá plniva .....	50
<b>3.6 Charakteristika plastů vhodných pro výrobu kompozitních materiálů .....</b>	<b>51</b>
3.6.1 Polypropylen .....	52
3.6.2 Celstran s PP matricí .....	55
3.6.2.1 Pultruze.....	58
<b>3.7 Vliv technologických podmínek vstřikovacího procesu.....</b>	<b>58</b>
3.7.1 Vstřikování termoplastů plněných dlouhými vlákny .....	59
<b>4. EXPERIMENTÁLNÍ SVAŘOVÁNÍ VYBRANÝCH TYPŮ PLASTŮ     ULTRAZVUKEM.....</b>	<b>63</b>
<b>4.1 Charakteristika zkoušených materiálů .....</b>	<b>63</b>
4.1.1 Celstran.....	63
4.1.2 Polypropylen .....	64
<b>4.2 Výroba vzorků .....</b>	<b>66</b>
<b>4.3 Svařování vzorků ultrazvukem.....</b>	<b>70</b>
<b>4.4 Sledování pevnosti svarových spojů .....</b>	<b>71</b>
<b>4.5 Statistické řešení pevnosti.....</b>	<b>74</b>
4.5.1 Řešení optimalizace.....	75
4.5.2 Ověření výsledků zvolené statistické metody .....	86
4.5.3 Ultrazvukové svařování podle absolutní vzdálenosti.....	90
<b>4.6 Stanovení orientace skelného vlákna ve svarovém spoji .....</b>	<b>96</b>
<b>5. DISKUZE VÝSLEDKŮ.....</b>	<b>101</b>
<b>6. ZÁVĚR.....</b>	<b>108</b>
<b>7. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>	<b>111</b>
<b>8. SEZNAM PŘÍLOH .....</b>	<b>113</b>

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

A	amplituda [m]
c	rychlost šíření vlnění ultrazvukových vln [ $\text{m.s}^{-1}$ ]
$c_m$	měrné teplo [ $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ]
$c_L$	rychlost šíření ultrazvukových podélných vln [ $\text{m.s}^{-1}$ ]
$c_T$	rychlost šíření ultrazvukových příčných vln [ $\text{m.s}^{-1}$ ]
D	smyková rychlost [ $\text{s}^{-1}$ ]
e	absolutní vzdálenost při ultrazvukovém svařování [mm]
E	Youngův modul pružnosti [MPa]
$E_a$	energie ultrazvukového vlnění [J]
F	přítlačná síla [N]
f	frekvence [kHz]
h	výška usměrňovače energie [mm]
$I_a$	intenzita ultrazvukového pole [ $\text{W.m}^{-2}$ ]
MFR	Melt mass / flow rate hmotnostní index toku taveniny termoplastů [ $\text{g.10}^{-1}.\text{min}^{-1}$ ]
m	exponent mocninového zákona
n	index lomu
$P_a$	akustický tlak [Pa]
$p_{ch}$	tlak při chladnutí svaru [MPa]
$p_{sv}$	svařovací tlak [MPa]
R	koeficient odrazu (reflexe) [%]
$t_{sv}$	svařovací čas [s]
$t_{ch}$	čas chladnutí [s]
T	perioda [s]
$T_g$	teplota zesklňování [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$T_f$	teplotu viskózního toku [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$T_m$	teplota tání [ $^{\circ}\text{C}$ ]
V	amplituda akustické rychlosti [ $\text{m.s}^{-1}$ ]
w	hustota akustické energie [ $\text{kg.m}^{-3}$ ]
y	okamžitá výchylka [m]
$y_m$	největší okamžitá výchylka – amplituda výchylky [m]



---

$Z_1, Z_2$	akustická impedance prostředí [ $\Omega$ ]
$Z_0$	vlnový odpor prostředí [ $\text{m}^{-2} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ ]
$\alpha$	úhel dopadu [ $^\circ$ ]
$\alpha'$	úhel odrazu [ $^\circ$ ]
$\beta$	úhel lomu [ $^\circ$ ]
$\nu$	smyková rychlost [ $\text{s}^{-1}$ ]
$\gamma_{\text{tp}}$	povrchová energie napětí na rozhraní tuhé a plynné fáze [ $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$ ]
$\gamma_{\text{tk}}$	povrchová energie rozhraní tuhé a kapalné fáze [ $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$ ]
$\gamma_{\text{kp}}$	povrchová energie rozhraní kapaliny a plynu [ $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$ ]
$\eta$	dynamická viskozita [ $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ]
$\eta_N$	newtonská viskozita [ $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ]
$\eta_{\text{zd}}$	zdánlivá viskozita [ $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ]
$\eta^\infty$	viskozita při nekonečném smyku [ $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ]
$\Theta$	úhel smáčení [ $^\circ$ ]
$\lambda$	vlnová délka [m]
$\lambda_t$	tepelná vodivost [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ]
$\rho$	hustota [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ]
$\sigma$	směrodatná odchylka [1]
$\tau$	smykové napětí [ $\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$ ]
$\tau_0$	počáteční smykové napětí v čase $t = 0$ [ $\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$ ]
$\Phi$	konstanta mocninového zákona – koeficient tekutosti [ $\text{s}^{-1}$ ]
$\varphi$	fázový úhel [rad]
$\omega$	úhlová frekvence [ $\text{s}^{-1}$ ]

ABS	termopolymer akrylonitril/butadien/styren
ETFE	kopolymer ethylenu a tetrafluorethylenu
EVA	kopolymer ethylenu s vinylacetátem
FEP	perfluoroethylen-propylen
PA	polyamid
PBT	polybutylentereftalát
PE	polyethylen



---

PET	polyethylentereftalát
PFA	perfluoralkoxy
PMMA	polymetymetakrylát
PP	polypropylen
PP-B	polypropylen – blokový kopolymer
PP-H	polypropylen – homopolymer
PPO	polyfenilenoxid
PP-S	polypropylen – statistický kopolymer
PPS	polyfenylensulfid
PS	polystyren
PSU	polysulfon
PTFE	polytetrafluorethylen
PVC	polyvinylchlorid
SAN	kopolymer styrenakrylonitril
TPU	termoplastický polyuretan
LFRT	long-fiber-reinforced thermoplastics – kompozitní materiály vyztužené dlouhými spojitými vlákny



## 1. ÚVOD

V konstrukčních aplikacích se stále častěji setkáváme s použitím plastů. Plasty nahrazují v mnoha průmyslových odvětvích dříve používané materiály. Důvodem je požadavek na snížení ceny výrobků a rostoucí nároky na mechanicko - fyzikální vlastnosti a kvalitu. Díky možnosti modifikovat mechanicko - fyzikální vlastnosti plastů pomocí přísad, se staly plasty v mnoha konstrukčních aplikacích naprosto nezastupitelné. Přísady mohou být stabilizátory, retardéry hoření, maziva, barviva, změkčovadla, tvrdidla, nadouvadla apod. Největší význam z přísad však mají plniva. Jejich pomocí je možno významně ovlivnit mechanicko-fyzikální a chemické vlastnosti a podmínky svařitelnosti. Polymer plní funkci pojiva a určuje základní fyzikální a mechanické vlastnosti hmoty. Plnivem mohou být rozličné druhy materiálů s různými tvary částic (globulární, vločkovité, vlákna apod.). Pro konstrukční aplikace s požadavky na vysokou vrubovou houževnatost byly vyvinuty polymery plněné dlouhými vlákny. Tyto polymery označujeme jako kompozitní materiály s dlouhými vlákny. Vhodným výběrem komponent, jejich vzájemným poměrem a geometrickým uspořádáním je možno vytvořit materiál prakticky na „míru“ pro zamýšlenou konstrukční aplikaci. Kompozitní materiály je možno zpracovávat a spojovat standardními technologiemi. Pro spojování kompozitů se často používají technologie svařování. Jednou z nejmodernějších metod svařování plastových dílů je technologie ultrazvukového svařování, která má v praxi čím dál větší uplatnění. Umožňuje docílit vysoce kvalitní svary a svařovací stroj lze využít i pro jiné aplikace (např. nýtování, tvarování, pěchování apod.). Na jednom stroji lze současně svařovat i na několika místech, což výrazným způsobem zvyšuje produktivitu výroby.

Na kvalitu svaru má vliv celá řada svařovacích parametrů. Jejich kontrolu je možno zajistit vhodnou konstrukcí svařovacího zařízení a odpovídajícím řídicím software. S rostoucí automatizací se zvyšuje stabilita procesu svařování a snižuje se vliv lidského faktoru. Další podmínkou pro zajištění kvalitního svarového spoje je svařitelnost zamýšlených svařovaných materiálů. Pro získání svarového spoje o vysoké pevnosti je nutné splnit následující podmínky:

- svařovat je možné pouze stejné materiály, i když u některých technologií je možná kombinace různých plastů ( např. u vibračního svařování )
- tavný index svařovaných plastů musí být stejný nebo velmi blízký

- chemická slučitelnost materiálů.

Svařování lze použít jen pro termoplasty, které lze přivést teplem do plastického stavu. Reaktoplasty nelze svařovat, protože po zpracování nejsou již dále tavitelné. Výhodné jsou termoplasty s širokou oblastí viskózního stavu (horní a spodní teplotou tání resp. teplotou viskózního toku) a termoplasty s pozvolným přechodem do tekutého stavu (např. PVC, PS, PE, PP).

Také použití plniv, barviv, způsob zpracování polotovaru může ovlivnit schopnost materiálu vytvářet kvalitní svary. Může se stát, že podmínky svařitelnosti jsou splněny, ale vlastní svařitelnost je špatná nebo polymerní materiál nelze vůbec svařit. V tomto případě se jedná o plněné termoplasty, kdy procento plniva je příliš vysoké anebo plasty mají zesíťovanou strukturu (např. radiačně síťovaný PE, PP, PA, EVA).

## 1.1 Historie ultrazvukového svařování plastů

První technické využití ultrazvuku bylo realizováno před a během druhé světové války (kolem roku 1929 se začal používat ultrazvuk při nedestruktivním zkoušení materiálu a za války byl především využíván v podmořské signalizaci). V poválečných letech byly zaváděny do strojírenského průmyslu první aplikace ultrazvuku, cca kolem roku 1948 se začalo např. s technologií obrábění ultrazvukem. Svařování plastů má v porovnání se svařováním kovů kratší dějiny. Praktické použití ultrazvukového svařování plastů se ve výrobě poprvé objevilo v polovině roku 1960. Tehdy se svařovaly pouze tzv. tvrdé plasty. Firma Branson byla jednou z prvních firem, která použila ultrazvuk v aplikačním procesu.

V roce 1963 bylo vyvinuto zařízení pro svařování plastů. Patent pro svařování termoplastických částí získal v roce 1965 Seymour Linsley a Robert S. Soloff, kteří pracovali pro firmu Branson. 30. dubna 1969, čtyři roky poté, co byl vydán patent, Robert S. Soloff založil firmu Sonics & Materials, Inc., která se specializuje na návrhy, vývoj a výrobu ultrazvukových zařízení. Od té doby jak používání ultrazvuku rostlo, tak se i společnost neustále rozvíjela. Ve světě se začal ultrazvuk používat v celé řadě nových technologických aplikací.

V roce 1969 byl vyroben první automobil, který měl karosérii a podvozek výhradně z plastů. Dvoudveřový Formacar byl sestaven pomocí ručních ultrazvukových pistolí. Od roku 1980 se

v automobilovém průmyslu již začala pravidelně používat technologie ultrazvukového svařování. Dnes se používá pro velké množství aplikací, např. ultrazvukové tvarování - nýtování, obrubování, lemování; integrování kovových dílů do plastových dílů, svařování netkaných tkanin aj.

Hlavní předností ultrazvukového svařování je rychlost, čistota provozu, účinnost, opakovatelnost procesu a možnost automatizace.

Mezi významné firmy v rámci vývoje ultrazvukových svařovacích procesů plastů patří např. firmy Dukane, Herrmann Ultrasonic Inc. a Branson.

U výše uvedených firem byla řešena problematika svařování plastů s ohledem na technologické parametry ultrazvukového svařování bez vlivu na specifika použitých materiálů (jako např. vliv množství plniva na technologii svařování plastů, resp. na jejich mechanické vlastnosti). Má doktorská práce se zabývá sledováním vlivu skelných vláken v plastu typu PP a geometrií svarových ploch těchto materiálů na pevnost svarového spoje.

## 1.2 Cíle disertační práce

Cílem řešení této disertační práce je problematika ultrazvukového svařování polypropylenu plněného dlouhými skelnými vlákny s různým % plnění skelného vlákna. Je zde řešen vliv množství skelných vláken v materiálu, změny velikosti hodnot vybraných technologických parametrů, konstrukční změny zkušebních vzorků na pevnost svarového spoje.

Jednotlivé cíle disertační práce lze shrnout do následujících bodů:

1. Teorie ultrazvukového svařování plastů
2. Návrh vstřikovací formy pro výrobu zkušebních vzorků s různou geometrií usměrňovače energie
3. Provedení experimentálních zkoušek se vzorky polypropylenu se skelným vláknem a na základě statistických měření vyhodnocení maximální smykové síly
4. Hodnocení vlivu změny velikosti vybraných technologických parametrů ultrazvukového svařování na pevnost výsledného svaru
5. Hodnocení vlivu procenta obsahu skelného vlákna na pevnost svaru



6. Zjištění optimální geometrie usměřovače energie pro polypropylen plněný skelným vláknem
7. Hodnocení orientace skelného vlákna ve svarovém spoji
8. Shrnutí dosažených výsledků při experimentech. Formulace závěrů pro uplatnění v technické praxi.

### 1.3 Přehled publikací k dané problematice

1. FRAJTOVÁ, L.: Ultrasonic plastic welding with reinforced long fibres. In: Mezinárodní Bařova Doktorandská Konference, Zlín, ČR 2007. ISBN 978-80-7318-529-9
2. FRAJTOVÁ, L.: Welding of the composite materials with long glass fibres. In: Mezinárodní konference MITECH 2007, Praha, ČR 2007. ISBN 978-80-213-1650-8
3. FRAJTOVÁ, L.: The influence of ultrasonic welding parameters on the joint strength and the change of the orientation of glass fibres in composites. In: Mezinárodní vědecká konference SI 2007, Bratislava, SK 2007. ISBN 978-80-227-2768-6
4. FRAJTOVÁ, L.: Ultrazvukové svařování vstřikovaných dílů z PP plněného skelnými vlákny. Zvláštní číslo Strojírenská technologie 2008. ISSN 1211-4162
5. FRAJTOVÁ, L.: Ultrasonic welding of PP reinforced long glass fibres injected parts. In: 2. Mezinárodní vědecká konference Nové poznatky v technologiích a technologické informace 2008, Ústí nad Labem, ČR 2008. ISBN 978-80-7044-969-1
6. FRAJTOVÁ, L. – LENFELD, P.: Temperature influence on the weld joint strength of injected parts from PP with glass fibres. In: ERIN 2008, Bratislava, SK 2008. ISBN 978-80-227-2849-2
7. FRAJTOVÁ, L. - LENFELD, P.: Comparison of weld strength at ultrasonic welding of the construction parts from PP and PP reinforced long glass fibres. In: MITECH 2008, Praha, ČR 2008. ISBN 978-80-213-1792-5
8. FRAJTOVÁ, L.: Analysis of the shape change of the energy director on the strength of the welding joint. In: X. International Conference of Young Scientists 2008, Praha, ČR 2008. ISBN 978-80-213-1812-0
9. FRAJTOVÁ, L.: Energy director geometry influence on the weld joint strength by ultrasonic welding. In: MITECH 2009, Praha, ČR 2009. ISBN 978-80-213-1931-8.

## 2. ULTRAZVUK A ULTRAZVUKOVÉ SVAŘOVÁNÍ PLASTŮ

Svařování plastů je proces spojování dílů z termoplastů za působení teploty nebo tlaku s přídatným materiálem nebo bez něho, přičemž se ve svařovací zóně spojovaných ploch nachází materiál v plastickém stavu. Svařování plastů je fyzikálním jevem - difúzí dvou stejnorodých materiálů. Teplota, jako jeden ze základních parametrů svařování, způsobuje zeslabení mezimolekulárních vazeb, což se projevuje poklesem viskozity, zvýšením pohyblivosti makromolekul, a tak dochází k tavení plastů a k přechodu do plastického stavu. Působením tlaku dochází ke splétání makromolekul svařovaných materiálů, přičemž vznikají mezimolekulární sekundární síly, které jsou závislé na teplotě svařování. Chladnutím svaru vazební síly rostou a tím i pevnost svarového spoje.

Ultrazvuk je mechanické vlnění s frekvencí vyšší než 16 kHz. Pro člověka je neslyšitelný, ale řada živočichů ho vnímá (delfíni, psi, netopýři).

Vlnové délky ultrazvuku jsou velmi malé, proto se vlnění postupující kolem běžných přírodních překážek prakticky vůbec neohýbá, takže ze směru jeho šíření můžeme poměrně přesně určit polohu jeho zdroje nebo tělesa, od něhož se odrazilo - platí zákon odrazu. Jeho jinou význačnou vlastností je, že na rozdíl od obyčejného zvukového vlnění je ultrazvuk ve vzduchu a jiných plynech značně absorbován, a to tím víc, čím je jeho vlnová délka menší. Malé pohlcování ultrazvuku ve vodě umožňuje použití stejné metody přístrojem zvaným sonar (echolot) při měření hloubky a reliéfu mořského dna a při hledání těles pod vodní hladinou.

Ultrazvuk používáme v mnoha oblastech lidské činnosti, např. při hledání dutin, prasklin nebo jiných skrytých vad různých materiálů nebo také jako ultrazvukovou sonografii v lékařské diagnostice. Vysokofrekvenční vibrace, do nichž jsou uváděny částice prostředí, kterým se šíří ultrazvukové vlny, umožňují např. odstraňování nečistot z povrchu výrobků drahých kovů, skel brýlí apod. Ultrazvuk se využívá také při opracování nejtvrdějších látek.

### 2.1 Fyzikální základy ultrazvuku [ 2, 3, 22]

Ultrazvukové vlny jsou vlny o jisté frekvenci, které – pokud přejdou z kmitajících těles do vzduchu – jsou dále přenosné vzduchem, nicméně pro lidské ucho jsou neslyšitelné.

V prostorově neohraničeném mediu se zvukové vlny budou šířit do nekonečna, pouze jejich energie se bude vzhledem ke ztrátě pravidelně snižovat. V praxi toto ale nikdy nenastane, protože prostor bývá obvykle ohraničen. Obraz šíření zvuku není proto nikdy lineární: je charakterizován odražejícími se vlnami, jejichž průběh je velmi komplikovaný.

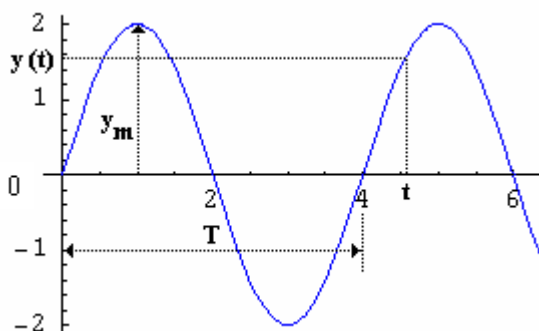
### 2.1.1 Vznik ultrazvukových vln

V ultrazvukovém poli vykonávají částice hmoty periodické kmitavé pohyby, které jsou vynucené zdrojem energie. Můžeme uvažovat, že ultrazvukové vlny tvoří nekonečný počet oscilujících hmotných částic spojených např. elastickou pružinou. Každá částice je ovlivňována kmitavým pohybem sousedních částic, což se navenek projevuje jako vlnění s určitou rychlostí  $c$ , která závisí na fyzikálních vlastnostech prostředí, ve kterém se šíří. Vlnění je charakterizováno šířením a přenosem energie bez přenosu hmoty.

Kmitavý pohyb – *kmitání (vlnění)* – se dá tedy vyvolat změnou rovnovážného stavu některé hmotné částice určitou silou. Když se opakuje kmitavý pohyb v určitém časovém intervalu, v čase s periodou  $T$ , přičemž nepřekročí určitou konečnou vzdálenost od tzv. rovnovážné polohy (což je taková poloha, v níž má těleso nejmenší potenciální energii) označujeme ho jako *harmonický pohyb*. Je to takový pohyb, kdy je okamžitá výchylka  $y$  z rovnovážné polohy popsána harmonickou funkcí (sin nebo cos). Největší okamžitá výchylka je amplituda výchylky  $y_m$  nebo zkráceně jen amplituda. Převrácená hodnota periody udává, kolikrát se opakuje kmit za jednotku času a nazýváme ji frekvencí  $f$ .

$$f = \frac{1}{T} \quad (2.1)$$

Grafem výchylky harmonického pohybu v závislosti na čase je sinusoida (obr. 2 -1).



Obr. 2-1 Graf – kmitavý harmonický pohyb

Rovnice harmonického pohybu znázorněného na obr. 2-1 má tvar:

$$y(t) = y_m \sin \omega t \quad (2.2)$$

Konstantní veličinu  $\omega$  označujeme jako úhlová frekvence. Její souvislost s periodou  $T$  a frekvencí  $f$  je dána vztahem:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f \quad [\text{s}^{-1}] \quad (2.3)$$

Za počátek měření času můžeme zvolit okamžik libovolné fáze harmonického pohybu. V tomto případě má rovnice tohoto pohybu tvar:

$$y(t) = y_m \sin(\omega t + \varphi_0) \quad (2.4)$$

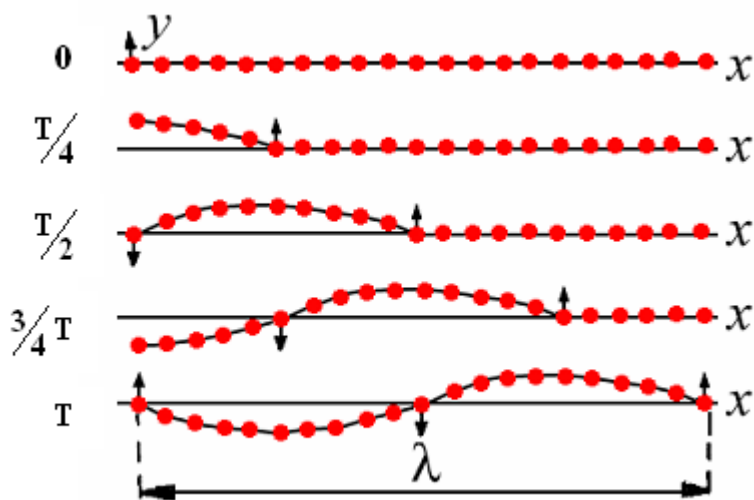
Časově proměnný výraz (úhel)  $\varphi(t) = \omega t + \varphi_0$  v této rovnici, který rozhoduje o velikosti i směru okamžité výchylky, nazýváme *okamžitá fáze* harmonického pohybu. Konstantní veličina (úhel)  $\varphi_0 = \varphi(0)$  je jeho *počáteční fáze*.

V reálných podmínkách je kmitání spojené se ztrátami energie pohybu působením třecí síly a síly odporu prostředí. Výchylka  $y$  se bude postupně zmenšovat, až se hmotná částice úplně zastaví v poloze 0. Tehdy hovoříme o *tlumeném kmitavém pohybu*.

Mechanické vlnění se šíří jen pružným prostředím a jeho rychlost  $c$  závisí na prostředí. Dráhu, kterou vlnění proběhne za jednu periodu  $T$ , nazýváme vlnová délka  $\lambda$ . Vlnová délka je obecně vzdálenost kterýchkoli dvou nejbližších bodů, které kmitají se stejnou fází (obr. 2-2). Body ve vzdálenosti  $\lambda/2$  kmitají s opačnou fází.

$$\lambda = \frac{c}{f} = c \cdot T \quad (2.5)$$

kde:  $c$  – rychlost šíření vlnění v prostředí (konstanta závislá jen na vlastním prostředí)

Obr. 2-2 Schéma zobrazení vlnové délky  $\lambda$ 

### 2.1.2 Druhy vlnění

Vlnění rozdělujeme podle směru kmitání částic prostředí vzhledem ke směru jeho šíření na dva hlavní druhy:

#### a) *podélné*

Nejsnáze vzniká *podélné vlnění*, které se při použití ultrazvuku také vyskytuje nejčastěji. Velmi dobře se šíří ve všech plynných, kapalných a pevných látkách. Vzniká tím, že částice kmitají ve směru šíření vlnění. Předpokladem vzniku vlnění je, že rozměry tělesa, ve kterém se vlnění šíří, jsou mnohem větší než vlnová délka  $\lambda$ .

#### b) *příčné* (transverzální)

Na rozdíl od podélných vln mohou tyto vlny vzniknout a šířit se pouze v pevných látkách. Jsou to elektromagnetické a vysokofrekvenční vlny, světlo apod. Pro buzení příčné vlny je zapotřebí axiální síla. Příčné vlnění vzniká kmitáním částic kolmo na směr buzení. Zejména v oblasti svařování ultrazvukem jsou takové vlny nežádoucí a je třeba je potlačit; rozkmitány jsou totiž jen povrchové plochy sonotrod a energie se nikdy nedostane na spojovací plochu spotřebitelů energie.

Rychlost šíření příčného vlnění  $c_t$  je přibližně poloviční než u podélného vlnění.



### 2.1.3 Odraz a lom ultrazvukových vln

Narazí-li šířící se vlnění na nějakou překážku, popř. na rozhraní mezi dvěma prostředími, která mají odlišné vlastnosti (vlnění se šíří různou rychlostí), pak se část ultrazvukové energie přenesle do druhého prostředí a část se odrazí zpět do prvního. Je-li plocha rozhraní dostatečně velká, je možné na dopadající ultrazvukový paprsek aplikovat zákony odrazu a lomu, analogické se zákony platnými v optice.

Množství odražené energie závisí také na úhlu dopadu  $\alpha$ . Poměr energie odražené k energii dopadající nazýváme koeficient odrazu (reflexe)  $R$ .

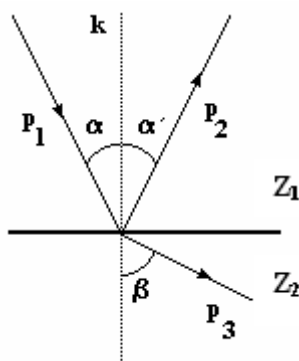
Známe-li akustickou impedanci jednotlivých prostředí ( $Z_1$ ,  $Z_2$ ), můžeme vypočítat koeficient odrazu:

$$R = \left( \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right)^2 \quad (2.6)$$

Zvláštní případ nastane při odrazu ultrazvukové energie na deskách. Při kolmém dopadu je koeficient odrazu závislý na tloušťce desky. Při šikmém dopadu na desku vznikne vlivem příčných složek mnoho druhů vlnění, která mají jiné vzájemné úhlové rychlosti.

Pro odraz mechanického vlnění platí **zákon odrazu**:

Úhel odrazu  $\alpha'$  vlnění se rovná úhlu dopadu  $\alpha$ . Odražený paprsek leží v rovině dopadu.



Obr. 2-3 Lom ultrazvukové podélné akustické vlny při šikmém dopadu na rozhraní dvou prostředí

*Lom vlnění* se projevuje změnou směru, kterým se vlnění po průchodu dvou rozhraní šíří. Rychlost v prvním prostředí je  $c_1$  a v druhém  $c_2$ .

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{c_1}{c_2} = n \quad (2.7)$$

kde:         $\alpha$         - úhel dopadu,  
               $\beta$         - úhel lomu,  
               $c_1, c_2$     - rychlosti šíření zvuku v různých prostředích,  
               $n$         - index lomu.

Platí **zákon lomu**:

Poměr sinu úhlu dopadu k sinu úhlu lomu je pro daná dvě prostředí stálá veličina a rovná se poměru rychlostí vlnění v obou prostředích. Nazývá se index lomu vlnění  $n$  pro daná prostředí. Lomený paprsek zůstává v rovině dopadu.

#### 2.1.4 Tlumení a absorpce vlnění

Při šíření ultrazvuku prostředím následkem tlumení kmitajících částic se absorbuje ultrazvuková energie a vznikají ztráty, které se přeměňují v teplo. Absorpce je v různých prostředích různá. Největší absorpci vykazují plyny, pak kapaliny a nakonec pevné látky. Z pevných látek mají největší absorpci korek, guma, „měkké plasty“ apod. Tlumení podélných vln je u těchto látek větší než tlumení příčných vln.

U materiálů s vysokou absorpcí se vyvíjí velmi mnoho tepla, což má za následek další vzrůst absorpce a nakonec rozrušení materiálu. Tento ohřev se však cílevědomě využívá při ultrazvukovém svařování termoplastů, přičemž dochází k jejich natavení a svaření.

#### 2.1.5 Energetické vlastnosti ultrazvukového pole

V prostoru, kde se šíří anebo je buzené ultrazvukové vlnění, vzniká ultrazvukové pole. Abychom ho mohli přesněji definovat, potřebujeme znát jeho mechanicko-akustické veličiny: akustický tlak, energii, intenzitu, výkon a mechanické impedance.

### 2.1.5.1 Akustický tlak

Při šíření ultrazvukové vlny se vytváří akustický tlak  $P_a$ , který je daný okamžitou odchylkou tlaku.

$$P_a = \omega \cdot y \cdot \rho \cdot c \quad (2.8)$$

Pro stanovení amplitudy akustické rychlosti částic a platí:

$$V = \omega \cdot y$$

Pak můžeme amplitudu tlaku  $P_a$  vyjádřit:

$$P_a = V \cdot \rho \cdot c \quad (2.9)$$

$$Z_0 = \rho \cdot c \quad (2.10)$$

kde:  $Z_0$  je vlnový odpor prostředí [ $\text{m}^{-2} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ ]

$\rho$  je hustota prostředí.

### 2.1.5.2 Energie ultrazvukového vlnění

Akustickou nebo-li ultrazvukovou energií  $E_a$  rozumíme energii přenášenou ultrazvukovým vlněním. Tato energie se v pružném prostředí šíří bez přenosu hmoty prostředí.

Pod hustotou akustické energie rozumíme diferenciální podíl akustické energie  $E_a$  a objemu  $V_o$ .

$$w = \frac{dE_a}{dV_o}$$

Střední hodnotu hustoty ultrazvukové energie přenášené vlněním můžeme vyjádřit:

$$w = \frac{1}{2} \frac{P_a V}{c} = \frac{1}{2} y^2 \omega^2 \rho \quad (2.11)$$

### 2.1.5.3 Intenzita ultrazvukového pole

Je to fyzikální veličina, která je definovaná jako výkon  $P$ , který prochází jednotkovou plochou  $S$ , kolmou na směr šíření ultrazvukového vlnění:

$$I_a = \frac{P}{S} \quad (2.12)$$

$$I_a = \frac{1}{2} y^2 \omega^2 Z_0 \quad (2.13)$$

Intenzita roste s druhou mocninou úhlové frekvence  $\omega^2$  a amplitudy výchylky  $y^2$  lineárně s vlnovým odporem  $Z_0$ . Z tohoto vyplývá, že ultrazvuk při vyšších frekvencích umožňuje dosáhnout vysoké intenzity ultrazvukových polí, a to zejména v kapalinách a tuhých látkách s vysokým vlnovým odporem  $Z_0$  při stejné výchylce  $y$ .

#### 2.1.5.4 Akustický výkon

Akustický výkon  $P$  je výkon přenášený ultrazvukovým vlněním. Rovná se diferenciálnímu podílu akustické energie  $E_a$  a času  $t$  podle vztahu:

$$P = \frac{dE_a}{dt} \quad (2.14)$$

Když ultrazvukový zdroj vytváří ve svém okolí ultrazvukové pole při překonávání setrvačných a pružných účinků prostředí vykonává i práci. Udržení tohoto stavu v daném prostředí tak od zdroje vyžaduje, aby byl schopný vykonat určitý akustický výkon. Akustický výkon ultrazvukového zdroje se rovná 1 wattu tehdy, když za dobu 1 sekundy dodá akustickou energii rovnající se 1 Joulu.

Lze ho vypočítat i z intenzity ultrazvukového pole:

$$P = I_a S \quad (2.15)$$

Kvantitativní určení akustického výkonu je v praxi velmi důležitým parametrem k posouzení vlivu ultrazvukové energie na technologické procesy jako je např. určování účinnosti ultrazvukových měničů.

## 2.2 Svařování ultrazvukem [ 2, 6 ]

Svařování ultrazvukem se používá pro kovy a plasty. Ačkoliv je základní princip stejný, praktické provedení se technologicky výrazně liší, především ve směru působení výchylky ultrazvukových kmitů. Při ultrazvukovém svařování plastů působí kmity i přítláčná síla kolmo na svařované plochy, u svařování kovů působí ultrazvuková energie na spoj ve směru svařovaných ploch a ve směru kolmém působí pouze přítláčná síla. Proto nejsou svařovací stroje univerzálně použitelné [ 2 ]. Jelikož je ultrazvukové svařování velmi rychlé, snadno automatizovatelné, je to velmi používaná technologie.

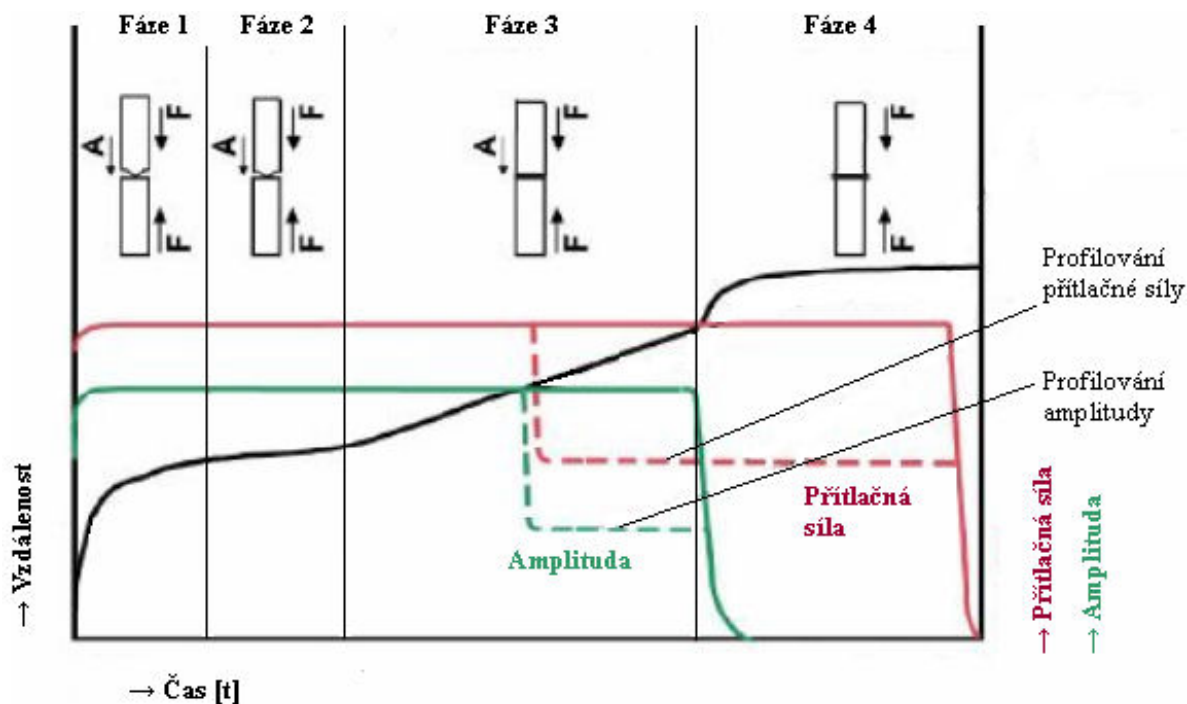
*Základní princip* ultrazvukového svařování plastů spočívá ve vzniku tepla, a to absorpcí ultrazvukového kmitání v plastech a třením na styčných plochách svařovaných dílů ultrazvukovými kmity, které se přenášejí do dílů ze svařovacího nástroje (sonotrody) při současném působení určité přítláčné síly. To znamená, že místo svaru je silně lokálně zahříváno ze dvou zdrojů, z kterých větší význam připisujeme tření na rozhraní svařovaných materiálů. Zvýšením teploty dochází ke snížení mezimolekulárních vazebních sil, což způsobí tavení plastu a jeho přechod do plastického stavu. Působení tlaku přispívá k tvorbě makromolekulárních zapletenin svařovaného materiálu, přičemž mezi makromolekulami vznikají mezimolekulární sekundární síly, které souvisí s teplotou svařování. Po ukončení působení ultrazvuku následuje nutná ochlazovací fáze při ještě existujícím spojovacím tlaku (tlak sonotrody  $0,2 \div 0,3$  MPa). Chladnutím svarového spoje vzniklé vazební síly rostou a dávají svarovému spoji pevnost. Svařovací tlak působí v ose sonotrody proti tzv. kovádlině, na které leží svařované materiály.

### 2.2.1 Proces svařování [ 22, 35 ]

Proces svařování plastů ultrazvukem lze rozdělit do čtyř fází (viz obr. 2-4):

1. v první fázi působením kmitů vzniká teplo, které svarový spoj lokálně ohřívá. Dochází k počátečnímu přitavení v místě usměrňovače energie pomocí tření hraničních ploch svařovaných součástí. Jakmile se část s usměrňovačem energie roztaví, začíná tok taveniny. Tok v roztavené části umožňuje svařovaným plochám těsné spojení. To znamená, že vzdálenost mezi plochami je molekulárních rozměrů. Jedním z výsledků toku taveniny je výskyt směrově orientované struktury (obr. 2-5). Oblast bude mít větší pevnost ve směru orientace, ale naopak menší ve směru kolmém k toku taveniny (viz kap. 3.7.4).

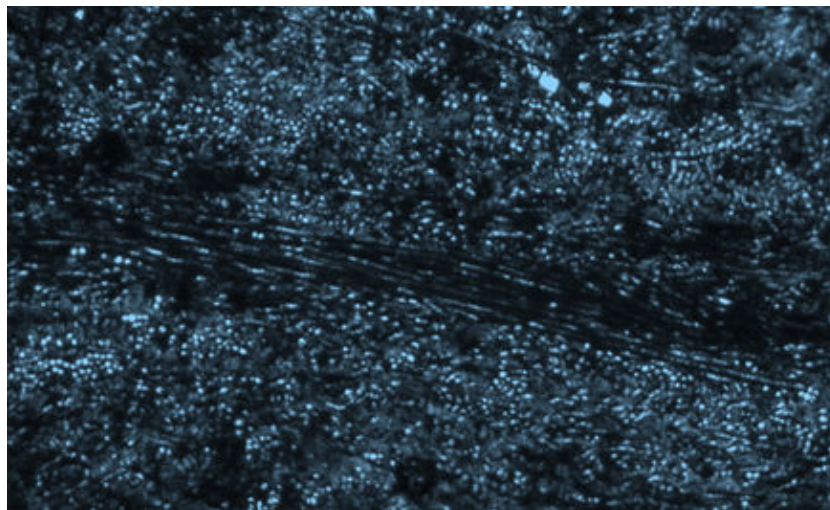
2. ve druhé fázi následuje spojení horního a spodního dílu. Spojované díly v místě styku plastifikují.
3. třetí fáze je charakterizována stabilním odtavováním. Ve svarovém spoji se tvoří konstantní vrstva taveniny, která je spojena konstantním rozvedením teploty v rovině svaru.
4. čtvrtá fáze – po ukončení přívodu ultrazvuku roztavený plast chladne a tuhne. Udržíme sevření součástí tak, aby došlo ke spojení. Toto je tzv. přitlačný cyklus. Je důležité, že tlak působí až do doby, kdy má svarový spoj dostatečnou pevnost a potlačí se tak vznik deformací. V této fázi se semikrystalické plasty částečně rekrystalizují do formy finální mikrostruktury. Stupeň krystalizace závisí na rychlosti chlazení. Pomalé ochlazování vede k vysoké krystalinitě a naopak rychlé ochlazování k nízké krystalinitě.



Obr. 2-4 Schéma průběhu svařování [35]

Na obr. 2-4 vidíme průběh amplitudy a přitlačné síly, které lze v průběhu svařování měnit. Svařovací proces zpravidla startuje s vyšší přitlačnou silou a ve stabilní fázi (fáze 3) se přepíná na nižší sílu. U řady aplikací na základě tvaru dílu a velikosti lze přepínání síly volit jen omezeně. V případě amplitudy lze jejím vyladěním dosáhnout kvalitnějšího svaru. Na rozdíl od přitlačné síly není profil amplitudy limitován velikostí dílu nebo jeho tvarem.

Profilování amplitudy přináší výrazné zlepšení kvality svarových spojů hlavně u amorfních plastů.



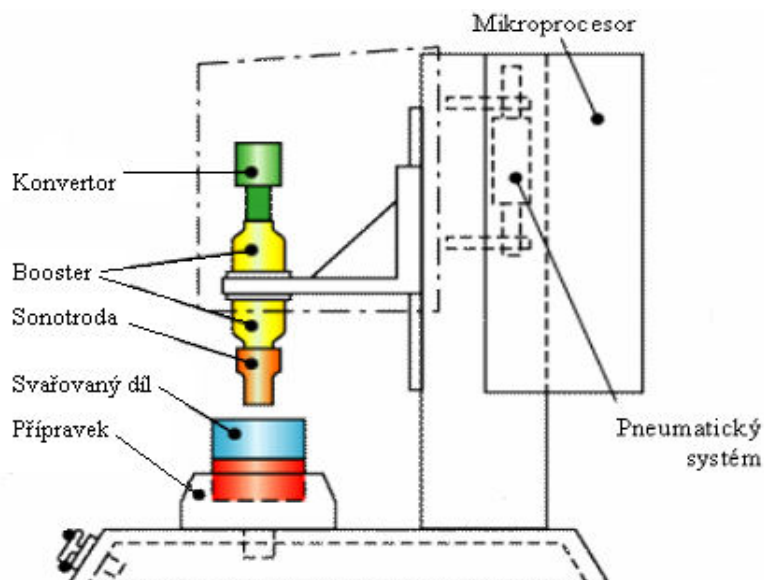
*Obr. 2-5 Změna orientace vláken ve svaru (36x zvětšeno)*

Jednotlivé fáze procesu svařování korelují s dosažením určitých pevností svarových spojů. Pevnost svarového spoje závisí vždy na tom, jaké podmínky tečení jsou v rovině svaru a na rychlosti spojování dílů. Výsledkem procesu je určitá tloušťka roztavené vrstvy, která má jednoznačnou souvislost s pevností svarového spoje (čím větší je tloušťka, tím větší je pevnost).

Pro řízení svařovacího procesu se používají celkem čtyři metody. Jejich názvy jsou odvozeny od toho, která veličina je při svařování primárně sledována a podle které je průběh procesu svařování řízen. Jedná se o metody - svařování podle času, energie, relativní vzdálenosti a podle absolutní vzdálenosti. Od momentu nasazení nástroje – sonotrody na svařovanou součást (v případě času, energie, relativní vzdálenosti) nebo od předepsané pozice (při svařování podle absolutní vzdálenosti) je díl svařován až do dosažení předepsané hodnoty kontrolované veličiny. Přitom jsou sledovány i ostatní parametry, což slouží k detekci odchylek a chyb.

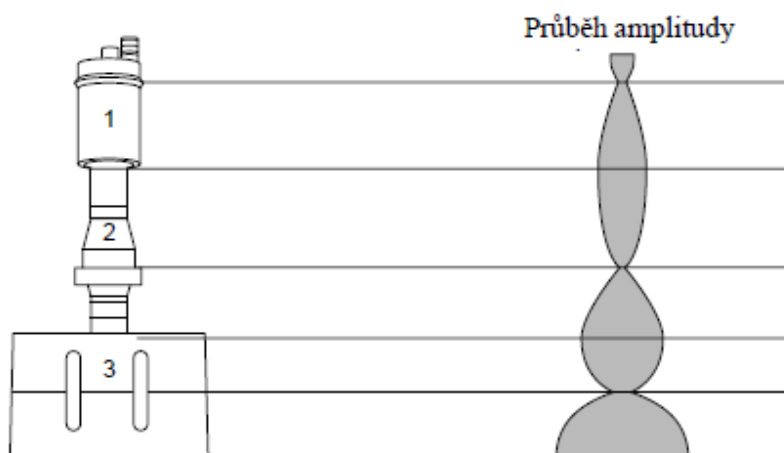
### **2.2.2 Ultrazvukový svařovací systém [ 22, 23, 24, 35 ]**

Základní sestava ultrazvukového svařovacího zařízení (obr. 2-6) obsahuje generátor elektrických impulsů, konvertor (měnič), booster a sonotrodu.



Obr. 2-6 Schéma zařízení pro svařování ultrazvukem [35]

Konvertor (1), booster (2) a sonotroda (3) jsou spojeny speciálními kolíkovými šrouby a vytváří společnou kmitající soustavu (obr. 2-7). Je konstruována tak, aby docházelo ke vhodné rezonanční frekvenci při 20 kHz. Tato je buzena konvertorem jako generátorem impulsů a způsobuje sinusový kmit, jehož tvar kmitu probíhá v podélném směru. Výsledný průběh amplitudy je na obr. 2-7. Aby bylo dosaženo optimálního přenosu energie kmitání, musí být vlastní rezonance sonotrody a boosteru shodná s budicí frekvencí konvertoru. V normálním případě to znamená, že geometrická délka sonotrody odpovídá polovině vlnové délky provozní frekvence. Na vstupu i na výstupu sonotrody vzniká vrchol amplitudy kmitů.

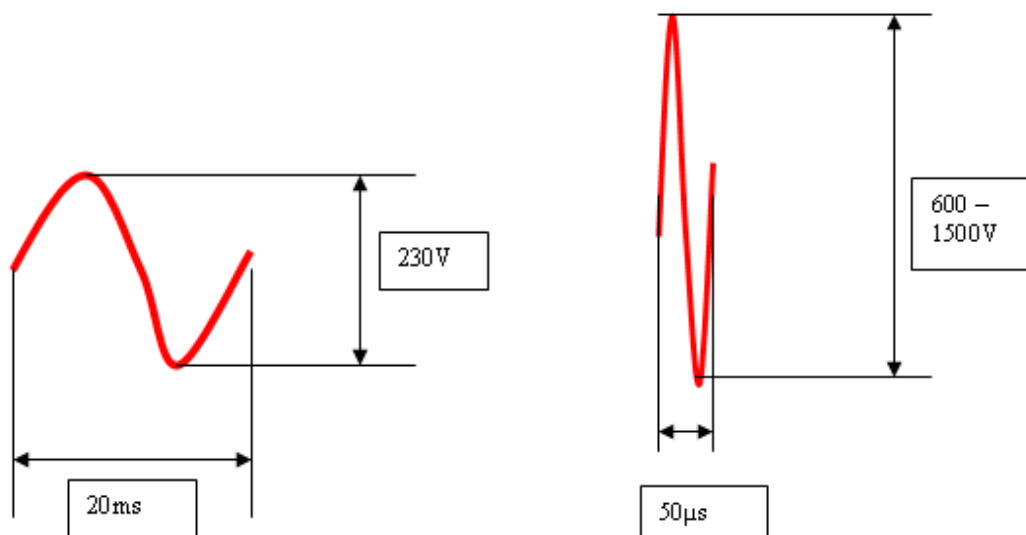


Obr. 2-7 Schéma kmitající soustavy s průběhem amplitudy [25]



### 2.2.2.1 Generátor

Generátor přeměňuje elektrickou energii se síťovou frekvencí 50 Hz na vysokofrekvenční energii s ultrazvukovou frekvencí. Jsou navrženy tak, aby produkovaly vysoké mechanické frekvence hlavně mezi  $20 \div 40$  kHz. Obvykle používáme tyto frekvence, protože při 20 kHz je frekvence nad frekvencí slyšitelnosti s dostatečně velkou amplitudou.



Obr. 2-8 Vlevo – síťové napětí, vpravo – napětí z generátoru [25]

### 2.2.2.2 Měnič (konvertor, transducer)

Měnič má za úkol převádět vysokofrekvenční elektrické kmity na mechanické kmity. Používají se dva principy přeměny elektrické energie - *piezoelektrický a magnetostrikční* (obr. 2-9).



Obr. 2-9 Měnič [22]

*Piezelektrický měnič* pro převod elektrické energie na mechanickou energii využívá tzv. piezelektrický jev. Ten se děje uvnitř měniče pomocí kruhových piezokeramických destiček. Tato piezokeramika je uměle polarizovaná a reaguje na změnu napětí změnou svých mechanických rozměrů. Přivedením vysokofrekvenčního střídavého napětí na měnič (konvertor) dochází ke změně délky v závislosti na napětí a frekvenci. Je-li přivedeno do měniče střídavé napětí v rozsahu 20 kHz, působí měnič jako generátor impulsů a je schopen vybudit vlastní rezonance oscilační soustavy. V současné době se pro ultrazvukové měniče používá nejvíce keramika (umělé polykrystalické materiály) ze zirkonátu a titanátu olova.

Moderní piezelektrický měnič se skládá ze dvou polykrystalických, keramických prvků, které jsou vrstveny na sebe a odděleny měděnými pláty. Sestavené (sendvičové) měniče mají celkově vyšší mechanickou jakost než-li ty, které se sestávají z jednoho kusu. I odvod teploty je podstatně vyšší než-li v průchozím keramickém materiálu. Celkové zařízení je vystaveno velké upínací síle a dále je naladěno na určitou frekvenci.

*Magnetostrikční měniče* využívají magnetostrikční jev ve feromagnetických materiálech na přeměnu elektrické energie na mechanickou kmitavou energii. Pracují na principu změny délek feromagnetických materiálů (např. slitiny niklu) při vstupu do magnetického pole. Tudíž, jakmile dojde na cívce k vytvoření magnetického pole, vlivem přívodu elektrické energie do cívky, dojde k cyklickým změnám délky měniče (konvertoru). Tento druh měniče se v dnešní době v ultrazvukovém svařování již příliš nepoužívá vzhledem k nízké schopnosti elektro-akustického přenosu (50%). Navíc, tento princip vyžaduje chlazení kapalinou a je nákladný na provoz.

Pro oba případy platí, že amplituda kmitů je velmi malá (3 až 5  $\mu\text{m}$ ) a je nutné ji vhodným transformátorem kmitů (booster) zvětšit až na optimální velikost amplitudy (pro PP 70 až 100  $\mu\text{m}$ ).

### 2.2.2.3 Booster

Booster přivádí mechanickou energii kmitů vytvářenou konvertorem na sonotrodu. Transformuje výstupní amplitudu z měniče (konvertoru) na velikost potřebnou pro sonotrodu. Amplitudy výchylky piezelektrických anebo magnetostrikčních měničů se pohybují v rozmezí 5 až 10  $\mu\text{m}$ . Z hlediska efektivnosti ultrazvukových technologií se vyžaduje, aby ultrazvukový nástroj (sonotroda) kmital s amplitudou výchylky 10 až 100  $\mu\text{m}$ .

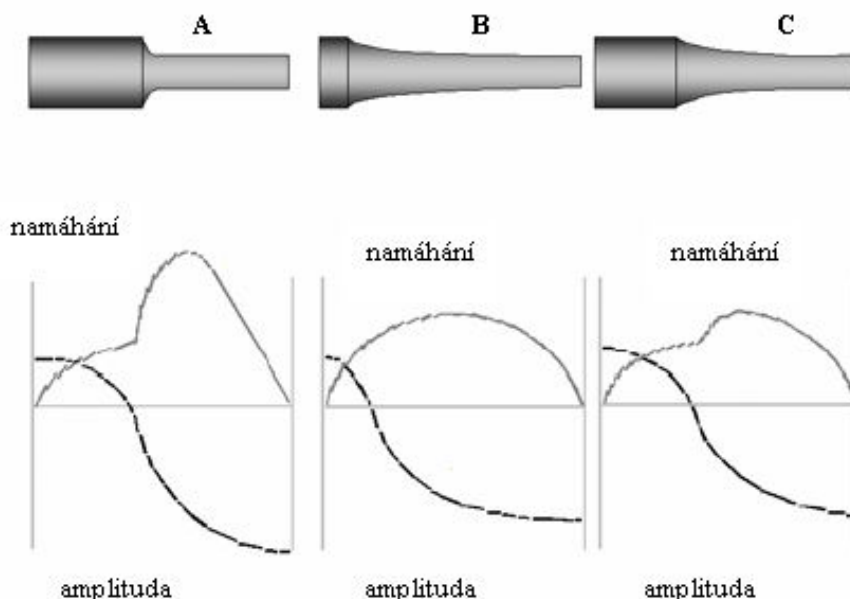


*Obr. 2-10 Booster [22]*

#### **2.2.2.4 Sonotroda**

Sonotroda je svařovací nástroj, jehož úkolem je přivést konvertorem upravený vysokofrekvenční mechanický výkon na svařovaný plastový díl.

Sonotrody pro ultrazvukové svařování termoplastů jsou vyráběny hlavně ze slitin hliníku a titanu. Oba dva kovy mají vynikající akustické vlastnosti a převádějí ultrazvukovou energii s minimálními ztrátami. Výběr materiálu na sonotrody záleží především na kompromisu mezi nastavením svařovaných součástí, konstrukcí součástí, materiálem součástí a jejich produkovaném množství. Hliníkové slitiny se obvykle volí pro větší sonotrody s nižšími amplitudami a menší produkcí. Titanové slitiny pro vysoké amplitudy, vysokou životnost a pro velké produkce (sériová výroba od 100 000 kusů/rok). Ačkoli hliníkové a titanové sonotrody mají dobré akustické vlastnosti, mají malou odolnost proti opotřebení. Toto může být zlepšeno speciálními nátěry a nástřiky (chrom, karbidy). Tvar sonotrody je důležitý kvůli napětí vyvolanému axiální expanzí a stahováním sonotrody a mohl by vést k praskání ve vysokých frekvencích. Špička sonotrody dodává ultrazvukovou energii do místa svaru. Pro zajištění maximálního přenosu energie je geometrie sonotrody shodná s geometrií svaru.



Obr. 2-11 Geometrie, rozložení amplitudy a napětí v: A – stupňovité sonotrodě

B – exponenciální sonotrodě

C – katenoidální sonotrodě [34,35]

Na obrázku 2-11 jsou znázorněny základní tvary nejčastěji používaných rotačně symetrických sonotrod, rozložení namáhání a amplitudy v několika standardních provedeních: *stupňovitá*, *exponenciální* a *katenuoidální sonotroda*. Je vidět, že změnou tvaru sonotrody, je možné měnit rozložení namáhání i amplitudu.

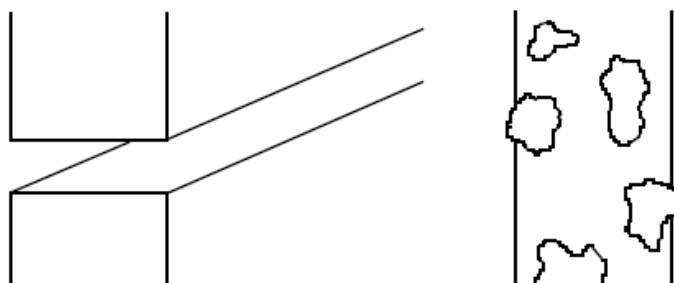
*Stupňovitá* sonotroda je snadnější na výrobu, produkuje velmi vysokou amplitudu, tudíž je ve struktuře velmi namáhaná. *Exponenciální* sonotroda je pro namáhání ideální, ale amplituda je velmi nízká. Nejdůležitější oblastí použití těchto sonotrod je zatavování kovových dílů do plastů. *Katenuoidální* sonotroda v sobě spojuje malou křivku namáhání a vysokou amplitudu. Nejvíce se uplatňuje u svařování ultrazvukem.

Konstrukce a výroba sonotrod, zejména tehdy, jedná-li se o zvláštní konstrukce, vyžaduje značné zkušenosti.

### 2.2.3 Kontaktní plochy svařovaných dílů [ 2, 8, 22, 23, 35 ]

Tvar a úprava kontaktních ploch svařovaných dílů podstatnou měrou ovlivňuje kvalitu svaru. Geometrie kontaktních ploch závisí na druhu plastu a požadavcích svařování. Nejjednodušší geometrii kontaktních ploch kterou lze použít, je spoj na tupo.

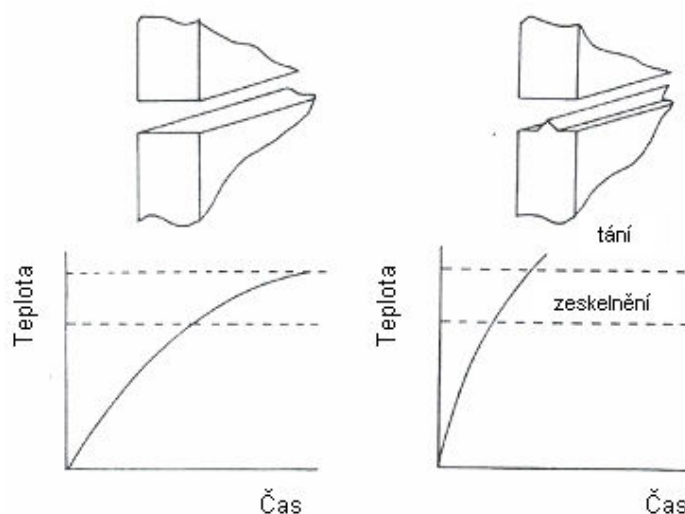
Při aplikaci svařování na tupo (obr. 2-12) dochází ke spojení pouze nejvyšších bodů na styčných plochách, čímž vznikají nepravidelné nekonzistentní svary. Spoj na tupo má dobrý vzhled, ale malou pevnost. Kromě toho nelze při tomto způsobu svařování vyloučit tepelná poškození materiálu.



*Obr. 2-12 Schéma aplikace svařování na tupo se zobrazením natavení nejvyšších bodů na styčných plochách (vpravo) [23]*

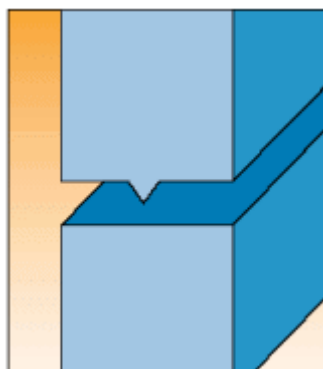
Možným řešením, jak problémy související s pevností a vzhledem svaru na tupo eliminovat, je použití usměrňovače energie. Usměrňovač má trojúhelníkový tvar a volí se jen na jednom ze svařovaných dílů, který je v přímém styku se sonotrodou. Použitím usměrňovače energie (obr. 2-15) získáme specifický objem materiálu, který se bude tavit. Tato úprava svarových ploch vede k dosažení vysokých hustot energie v zóně svaru. Jeho kontakt s rovnou plochou druhého dílu svařence způsobí velice rychlé zahřátí kmitajícího materiálu, který začne měknout. Tavením materiálu se zvýší hodnota činitele tlumení a tak se mění v místě svaru více energie na teplo, což vede k dalšímu tavení. Celý proces způsobí to, že v zóně spoje dochází k rychlému natavení materiálu a působením tlaku je tavenina tlačena ze zóny švu ven. Jakmile nastane tento stav, je přívod energie zastaven a díl je pod uzavírací silou vystaven krátké fázi chlazení. Na obr. 2-13 je schéma spoje na tupo bez a

s usměrňovačem energie spolu s grafickým zobrazením rozdílu v rychlosti tání semikrystalických plastů.

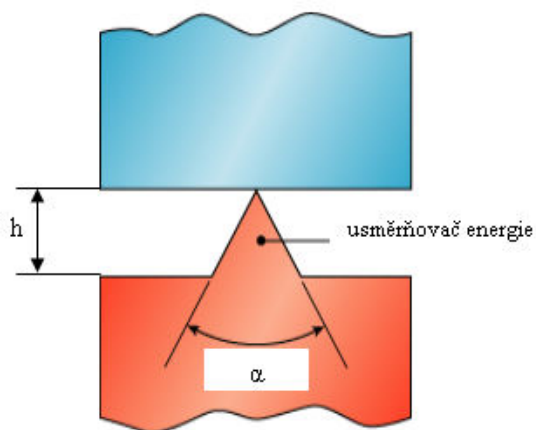


Obr. 2-13 Graf závislosti teplota – čas v místě svaru pro spoj bez a s usměrňovačem energie pro semikrystalické plasty [23]

Běžná hodnota úhlu  $\alpha$  usměrňovače energie pro semikrystalické plasty je  $60^\circ$  (pro amorfní plasty je běžná hodnota úhlu  $\alpha$  usměrňovače energie  $90^\circ$ ). V případech, kdy takto navržená velikost usměrňovače produkuje příliš mnoho taveniny, může být úhel  $\alpha$  ostřejší. Výška usměrňovače energie  $h$  se řídí podle požadavků a velikosti svařence. Může se pohybovat mezi 0,15 až 1,5 mm. Větší usměrňovač energie produkuje více taveniny, která může nepříznivě ovlivnit optický vzhled dílu. V případě špatně vystříknutých dílů se příliš malý usměrňovač energie vůbec neuplatní kvůli nerovnostem a propadlinám.



Obr. 2-14 Spoj na tupo s usměrňovačem [29]



Obr. 2-15 Usměrňovač energie [29]

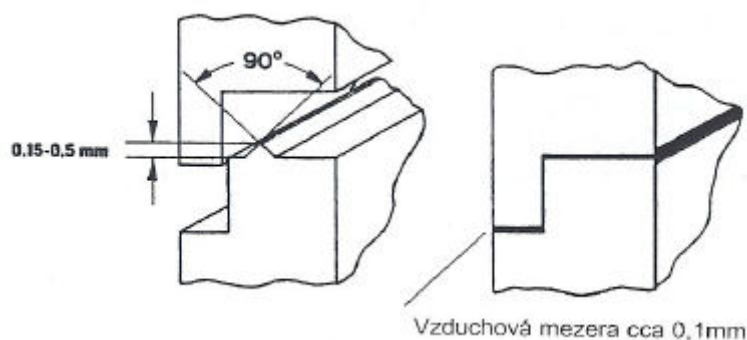
### 2.2.3.1 Svarové spoje s usměrňovačem energie [ 8, 35 ]

Složitější geometrická úprava styčných ploch a přesnější rozměry usměrňovačů energie vždy závisí na svařovaných dílech a svařovaných materiálech. Příkladem může být břitový styk s jednoduchým (obr. 2-16) nebo dvojitým vedením (pero-drážka) (obr. 2-17). Doporučuje se pro termoplasty s nízkou teplotou tavení. V tabulce 2.1 jsou příklady svarových spojů s vhodnými plasty.

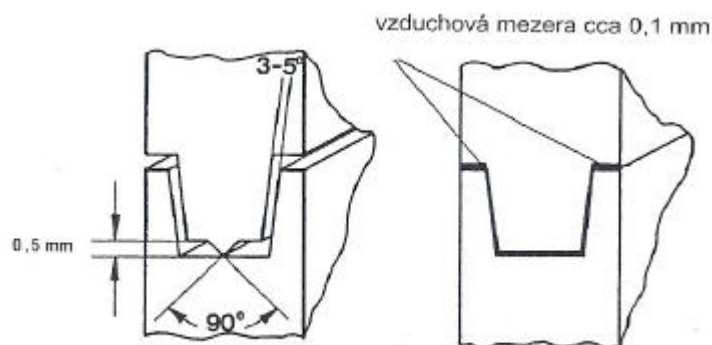
**Tab.2.1 Příklady svarových spojů s vhodnými plasty**

Svar	Plast
Břitový styk s jednoduchým vedením	PS, SAN, PVC, PP, PE
Břitový styk s dvojitým vedením	PS, ABC, PC, PMMA, PP, PE
Střížný styk	PA, POM, PP, PE

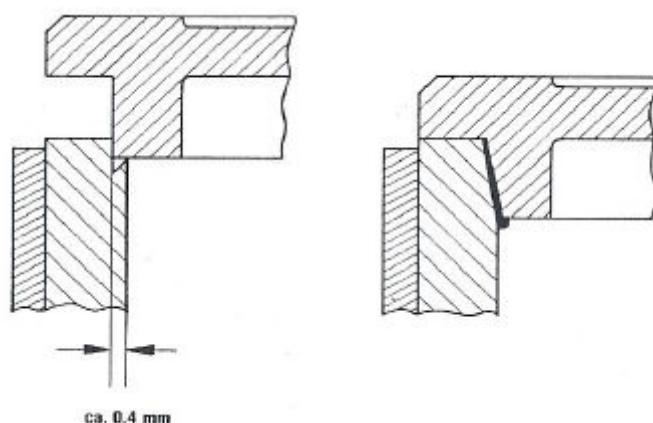
U termoplastů s vyšší teplotou tavení, popřípadě u rychle krystalizujících, se používá střížný styk (obr. 2-18). U střížného styku vznikne větší provařená plocha a spotřebuje se méně energie. Název střížný styk je odvozen od toho, že se během svařování stykové hrany obou součástí odtavením sestříhnou.



**Obr. 2-16 Schéma břitového styku s jednoduchým vedením**



Obr. 2-17 Schéma břitového styku s dvojitým vedením

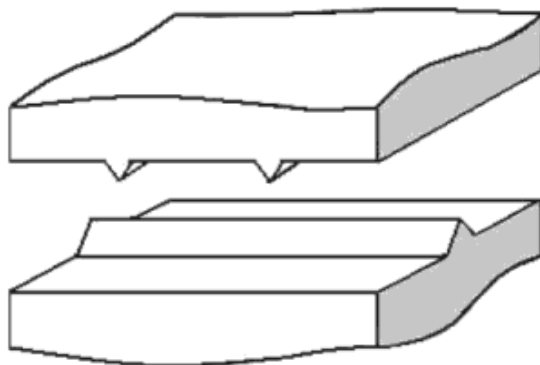


Obr. 2-18 Schéma střížného styku

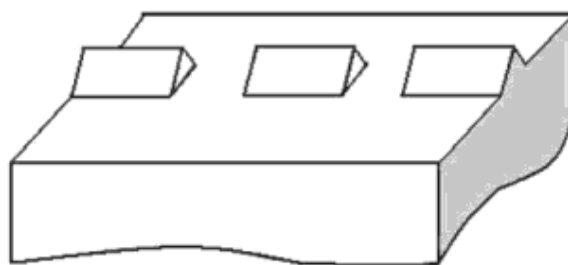
Na obr. 2-19 a obr. 2-20 jsou uvedeny méně používané úpravy svařovaných ploch. Na obr. 2-19 je křížový styk, usměrňovače energie jsou na obou svařovaných plochách a jsou navzájem kolmé. Tento spoj zajišťuje minimální počáteční kontakt na rozhraní svařovaných částí s potenciálně větším objemem materiálu zúčastněným při svařování. Velikost usměrňovače energie by měla být kolem 60 % standardně používaných usměrňovačů energie.

Přerušovaný usměrňovač energie obr. 2-20 se používá k redukci celkové svařované plochy. Pro svařování je pak potřeba méně energie.





*Obr. 2-19 Schéma křížového styku*



*Obr. 2-20 Schéma styku s přerušovaným usměrňovačem energie*

#### **2.2.4 Fixační přípravek**

Při procesu svařování je nutné zajistit vzájemnou polohu svařovaného dílu pod svařovacím nástrojem - sonotrodou. K tomuto účelu slouží fixační přípravek. Pro konstrukci přípravku platí několik zásad, které je nutno dodržet. Je nutno zajistit, aby mezi spodní polovinou svařovaného dílu a fixačním přípravkem nebyla intenzivní vazba. V případě, že by toto nebylo zajištěno, došlo by ke ztrátě ultrazvukové energie, která by byla převedena do fixačního přípravku a rámu svařovacího stroje. Také vazba mezi sonotrodou a horním plastovým dílem by v ideálním případě měla být téměř dokonalá a žádná energie kmitání by neměla být přenášena na spodní plastový díl s výjimkou místa spojení. V praxi je to nerealizovatelné nebo jen částečně a tak cesta ke skutečně kvalitnímu svaru vede přes tvarování ploch svarového spoje. Skutečnost, že při svařování ultrazvukem může dojít

k výrazně odlišným výsledkům je nesporná. Důvody mohou být různé. Praxe ukazuje, že v mnoha případech vede ke zlepšení změna uchycení.

Fixační přípravky jsou navrhovány podle požadavků jednotlivých aplikací. Nejčastějším typem jsou přípravky pružné a pevné viz obr. 2- 21.

*Pružné přípravky* se používají pro amorfní plasty, jsou méně nákladné na výrobu – vyrábějí se z licí pryskyřice.

*Pevné přípravky* se používají pro semikrystalické plasty, dále při nýtování, zatahování kovových vložek v plastových dílech, obrubování, lemování aj. Vyrábějí se z hliníku nebo nerezavějící oceli.



Obr. 2- 21 Pružný fixační přípravek pro amorfní plasty – vlevo

*Pevný fixační přípravek pro semikrystalické plasty - vpravo*



Obr. 2-22 Schémata příkladů upnutí plastových dílů v přípravku a) s usměrňovačem energie

*b) u střihového styku*

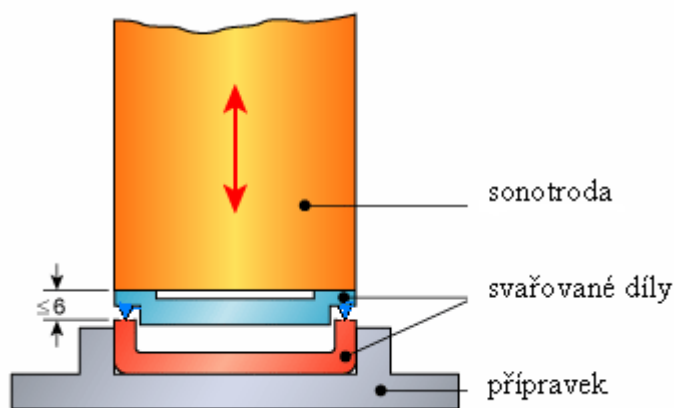
### 2.2.5 Svařování v blízkém a dalekém poli [ 2, 5 ]

V závislosti na druhu plastu a konstrukčním řešení svařovaných součástí je možné svařování realizovat dvěma způsoby:

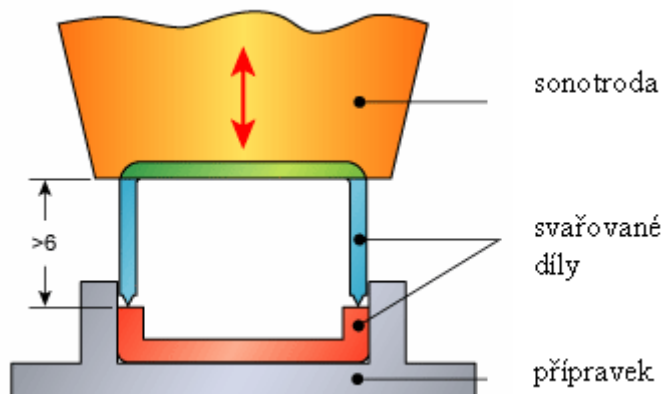
- a) svařování v blízkém poli (kontaktní) – obr. 2-23
- b) svařování v dalekém poli (odlehlé, distanční) – obr. 2-24.

První způsob je vhodný pro „měkké“ materiály (semikrystalické - PA, PE, PP, PVC, POM), tj. pro plasty s vysokým stupněm tlumení (absorpce) ultrazvukového vlnění a s nízkým modulem pružnosti E. Maximální vzdálenost sonotrody od místa spoje je  $4,5 \div 6$  mm.

Druhý způsob svařování je možné použít do vzdálenosti  $\approx 200$  mm od výstupní plochy sonotrody. Vhodný je jen pro materiály s vysokým modulem pružnosti a nízkým stupněm tlumení ultrazvukového vlnění tzv. tvrdé plasty (amorfní - PS, ABS, SAN, PMMA, PC atd.).



Obr. 2-23 Schéma svařování v blízkém poli [31]



Obr. 2-24 Schéma svařování v dalekém poli [31]

Nástroje pro svařování v blízkém poli vyžadují, aby výstupní plocha sonotrody kopírovala vnější povrch jednoho ze spojovaných dílů v rovině budoucího svarového spoje. Nástroje pro svařování v dalekém poli jsou konstrukčně jednodušší, vyžadují volit plochu styku dostatečně velkou a výstupní plochu ultrazvukového nástroje tvarovat jako negativ k ploše svařovaného dílu.

## 2.3 Hlavní parametry ultrazvukového svařování [ 2, 35 ]

Kvalita a pevnost svarového spoje závisí na:

- a) svařovacím čase a čase chlazení
- b) amplitudě kmitání
- c) přítláčné síle při svařování a chlazení
- d) frekvenci
- e) konstrukci svarového spoje (velikost usměrňovače energie).

### 2.3.1 Svařovací čas $t_{sv}$ a čas chlazení $t_{ch}$

Svařovací čas  $t_{sv}$  je čas působení ultrazvukových kmitů na svařovaný díl. V závislosti na ostatních parametrech má pro jednotlivé druhy a tloušťky materiálů různé optimální hodnoty v rozmezí cca 0,5 do 3 s. Plasty s vyšší teplotou tání vyžadují delší svařovací časy. Ovšem velmi dlouhé svařovací časy při určité amplitudě výchylky způsobují značné přehřátí spojů, což zapříčiňuje velkou deformaci plastů a výronky z nataveného materiálu v okolí svaru.

Experimentální optimalizací všech tří nastavitelných parametrů, tj. amplitudy výchylky sonotrody, přítláčné síly a svařovacího času je možné tyto negativní vlivy vyloučit.

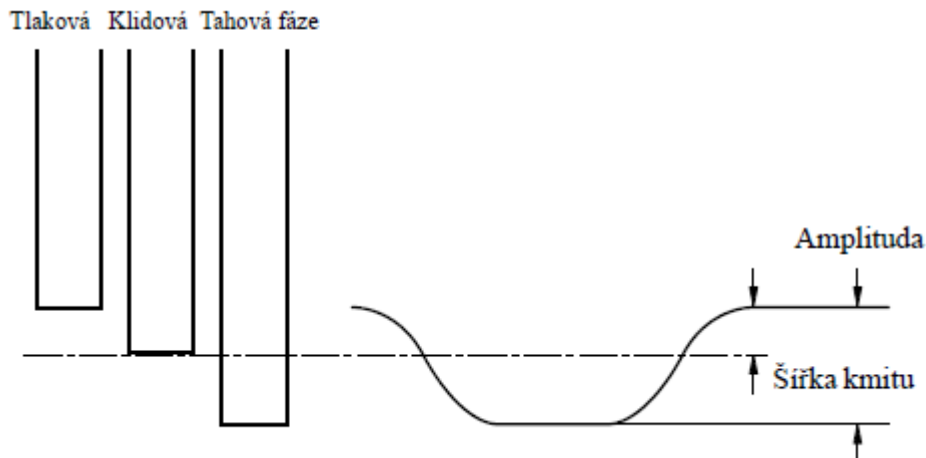
Čas chlazení je čas sevření svařovaných dílů, kdy již nejsou přiváděny do svaru ultrazvukové kmity. Velmi malá část aplikací překračuje čas chlazení  $t_{ch} = 3$  s, v případě, že by svařované části nebyly řádně spojeny, pak se používá delší čas chlazení  $t_{ch}$ .

### 2.3.2 Amplituda a přítláčná síla

Velikost amplitudy výchylky je daná výkonem a konstrukčním řešením ultrazvukového svařovacího zařízení, tj. vlastní ultrazvukovou kmitající soustavou (konvertor

+ booster + sonotroda) a výkonem generátoru. Hodnotu amplitudy výchylky nelze během svařovacího procesu považovat vždy za konstantní. Amplitudu výchylky může do značné míry ovlivňovat během svařování přítlačná síla, kterou se vytváří vazba se svařovanými materiály, čímž se umožní a zároveň určuje velikost přenosu ultrazvukové energie. Moderní ultrazvukové svařovací stroje umožňují dovolit profilování amplitudy výchylky. Vysoká amplituda výchylky může být použita pro uvedení termoplastu do stavu tavení a dále může být používána amplituda výchylky nižší, abychom kontrolovali viskozitu roztaveného materiálu. Její průměrné hodnoty závisí na druhu svařovaného termoplastu. Jelikož mechanické zatížení kmitající soustavy závisí bezprostředně na amplitudě výchylky a tím má přímý vliv na životnost, je nutno dbát na to, aby amplituda byla vždy volena pouze tak velká, jak je zapotřebí.

Jako amplituda (polovina šířky kmitu) se označuje změna délky mezi klidovou a tahovou resp. tlakovou fází. Šířka kmitu je celková vzdálenost (špička – špička), kterou urazí jednotlivé body kmitavé soustavy mezi tlakovou a tahovou fází - zobrazení je uvedeno na obr. 2-25.



Obr. 2-25 Schéma poloh sonotrody s odpovídajícím tvarem kmitů [25]

Velikost přítlačné síly se pro plasty volí 0,5 až 10 MPa. Optimální hodnoty amplitudy výchylky, přítlačné síly a délka jejich působení se pro zvolený svařovaný materiál získávají experimentálně. Velmi malá hodnota přítlačné síly nezabezpečí dostatečnou vazbu mezi horním svařovaným dílem a sonotrodou, vzhledem k tomu, že větší část energie pohltí horní díl.



Obecně semikrystalické materiály potřebují větší energii, a proto větší sonotrodu a větší rozkmit než je tomu u amorfních materiálů.

### **2.3.3 Frekvence**

Pro přenos ultrazvukové energie do místa svaru a zajištění jeho tvorby je výhodnější pracovat s frekvencí 20 kHz, kdy je možné přivést do místa svarů velké ultrazvukové výkony při maximální účinnosti ultrazvukové kmitající soustavy. (V některých speciálních případech je frekvence určena rozměry svařovaných součástí. Při malých rozměrech – např. dráty o průměru 10 až 50  $\mu\text{m}$ , že je nutné použít frekvenci v pásmu 40 až 60 kHz, kde jsou amplitudy výchylek podstatně menší). Frekvence ultrazvukových svařovacích zařízení je dána rezonanční frekvencí ultrazvukové kmitající soustavy (odstavec 2.2.2).



### 3. CHARAKTERISTIKA PLASTŮ POUŽITÝCH PRO SVAŘOVÁNÍ ULTRAZVUKEM [ 1, 4, 5, 22, 23 ]

#### 3.1 Svařitelnost plastů

Pod pojmem svařitelnost plastů ultrazvukem rozumíme schopnost jednotlivých druhů plastů vytvořit působením ultrazvukové energie za předpokladu určité úpravy svařovaných dílů v místě svaru vyhovující svarový spoj.

#### 3.2 Vliv faktorů na svařitelnost plastů ultrazvukem

- a) Struktura
- b) Molekulová hmotnost
- c) Stabilita ve fázi tání

##### 3.2.1 Struktura

Struktura plastů je důležitým faktorem pro svařování. Jak je obecně známo, termoplasty lze rozdělit do dvou skupin (nezávisle na dalším způsobu členění) - na semikrystalické a amorfní.

*Semikrystalické plasty* jsou polymery, jejichž molekuly mají tendenci včlenit se v přechodové fázi mezi tekutým a pevným stavem do různě zřetelně ohraničených útvarů ve tvaru polygonů. Podle existujícího poklesu teploty se tyto elementy ukládají do více či méně pravidelných útvarů nazývaných sférolity. Sférolit je vyšším nadmolekulárním útvarem vznikajícím radiálním růstem lamel z jednoho krystalizačního centra, svým tvarem připomíná zrno kovů. Od nich se však liší tím, že nejsou krystalová individua s mřížkovými poruchami, ale strukturně velmi složité útvary.

Čím je pokles teploty větší (čím rychleji tavenina chladne), tím méně času je pro vytvoření takových útvarů: krystalický podíl ztuhlého plastu je pak nízký. U většiny (neplněných a nezbarvených) semikrystalických plastů je tento výsledek často viditelný - čím menší je krystalický podíl, tím je plast průhlednější. Další zahřátí podpoří ve většině případů tvorbu krystalů - plast se zkalí. Proces dodatečné krystalizace může probíhat celé měsíce.

*Amorfní plasty* nevykazují v mikrografii zařazení elementů, mají neuspořádanou strukturu. Základním morfologickým útvarem jsou globuly (klubíčka). Makromolekuly zauímají nahodilou pozici vůči jiným makromolekulám. Proto se nazývají amorfní (bez tvaru), za laboratorních teplot jsou tvrdé a křehké. Semikrystalické plasty jsou vlivem těsnějšího uspořádání makromolekul a tím i větších soudržných sil pevnější a houževnatější v porovnání s amorfními plasty.

Běžné *semikrystalickými plasty* jsou:

- nízkotlaký polyethylen (polyethylen s vysokou hustotou)
- vysokotlaký polyethylen (polyethylen o malé hustotě)
- polypropylen PP
- polyamid PA (ne však aromatické transparentní polyamidy)
- polybutyltereftalát (PBT, některé typy PET – obě skupiny známé také jako termoplastické polyestery)
- polyfenylsulfid (PPS)
- fluoroplasty (PTFE – FEP – PFA – ETFE atd.)

Běžné *amorfní termoplasty* jsou:

- polystyrén a polystyrénové „slitiny“ (ABS, SAN, ASA apod.)
- metakryláty
- polykarbonáty
- polysulfony PSU a polyetersulfony
- acetát celulosy
- propionát celulosy
- PVC (tvrdý a měkký)
- polyfenilenoxid PPO

**Pro porovnání obou skupin plastů** jsou důležitá následující hlediska: chemická odolnost, měknutí plastů s rostoucí teplotou, tečení, součinitele tření, střídavé namáhání, potřeba měrného tepla pro svařování ultrazvukem.



*Chemická odolnost* - z hlediska techniky spojování plastů pomocí ultrazvuku není chemická odolnost podstatná. Semikrystalické plasty jsou obecně odolné vůči rozpouštědlům, zatímco amorfny termoplasty nikoliv. Ty jsou zase na rozdíl od semikrystalických plastů odolné vůči kyselinám a alkáliím.

*Měknutí plastů s rostoucí teplotou* - semikrystalický plast ztrácí s rostoucí teplotou poměrně rychle svoji tuhost, nicméně až do teploty tání  $T_m$  si ponechává určitou zbytkovou tuhost. U amorfny plastů se po dosažení teploty zesklnění  $T_g$  (u zcela amorfny plastů nelze dokázat teplotu tání) tuhost velmi snižuje, (modul pružnosti klesá asi o tři řády) přestože dosud neexistuje vlastní tavenina.

Pokud jde o techniku svařování ultrazvukem je třeba uvést, že amorfny plast, poté co dosáhne teploty zesklnění vykazuje výrazný skok v hodnotě činitele tlumení (měknutí pokračuje velmi rychle), zatímco semikrystalické plasty takový skok vykazují v bezprostřední blízkosti teploty tání. Tento faktor vysvětluje skutečnost, že amorfny plasty lze obecně svařovat s menší ultrazvukovou energií: čím rychleji se činitel tlumení zvýší, tím menší jsou ztráty energie na ostatních místech svařovaného dílu.

*Tečení* - amorfny plasty vykazují daleko menší tečení než-li semikrystalické plasty. Výjimku představují amorfny plasty s elastomery nebo se změkčovadly.

Tyto poznatky ukazují, že použití ultrazvukové techniky může mít výrazné přednosti tam, kde je třeba do amorfny termoplastů usadit kovové části. Je obecně známo, že kovové díly, které by se vkládaly a zastříkávaly do vstřikovaných dílů způsobují setrvání tangenciálního napětí v hrotech pro uchycení, protože vložený kovový díl brání kmitání ve svém okolí.

*Součinitel tření* - u semikrystalických plastů jsou hodnoty součinitele tření celkově nižší než u amorfny plastů. I když jen malá část tepla, které je potřebné k natavení vzniká třením mezi dvěma polovinami svařovaného dílu, jsou semikrystalické plasty v tomto ohledu poněkud v nevýhodě.

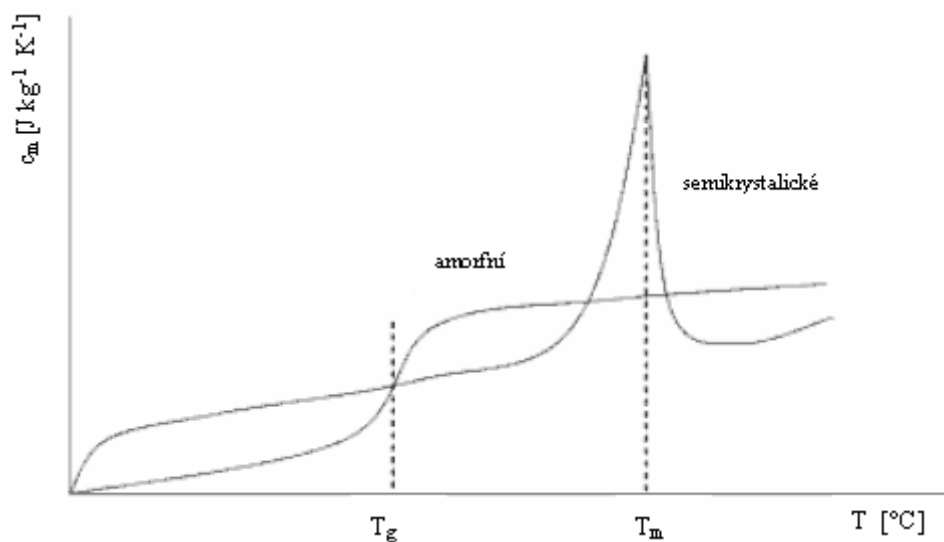
*Střídavé namáhání* - vzhledem k tomu, že semikrystalické plasty vykazují seřazení makromolekul do útvarů (sférolity) jsou body styku (body křížení) mezi makromolekulami menší než u amorfny plastů. Úměrně tomu je menší i množství tepla, které vzniká

mezimolekulárním třením. Střídavým zatížením vyvolaná „únavá“ plastu je funkcí množství tepla vyrobeného třením.

Přivedená ultrazvukové energie v procesu svařování předpokládá cílenou a místně určenou výrobu tepla z mezimolekulárního tření, aby bylo možno docílit určitý druh „únavy“ plastu v místě svarového spoje. Z toho vyplývá, že pro svařování ultrazvukem je potřeba tím víc energie, čím vyšší specifické napětí připustí plast ve střídavém zatížení.

Vzhledem k tomu, že amorfní plasty připustí jen poměrně nízké specifické hodnoty střídavého napětí, potřebuje ve srovnání se semikrystalickými plasty výrazně méně energie pro svařování pomocí ultrazvuku.

*Potřeba měrného tepla pro svařování ultrazvukem* – obrázek 3-1 ukazuje typické křivky potřeby množství tepla pro semikrystalické a amorfní plasty. Obě skupiny materiálů se liší ve spotřebě energie. Amorfní plasty nemají definovaný bod tání. Při zahřátí postupně měknou jak přecházejí z tuhého stavu přes sklovitý (teplota zesklenní  $T_g$ ) do kaučkovitého stavu, po kterém následuje tok taveniny. Semikrystalické plasty mají ostrý bod tání. Vysoký stupeň tepelné energie je nutný k porušení krystalické struktury. Semikrystalické plasty zůstávají pevné dokud nedosáhnou teploty tání  $T_m$  a poté se okamžitě stávají tekutými. Je tedy samozřejmé, že amorfní plasty potřebují méně energie i při svařování ultrazvukem.



Obr. 3-1 Porovnání potřeby měrného tepla pro svařování amorfních a semikrystalických plastů ultrazvukem [35]

### 3.2.2 Molekulová hmotnost

Molekulová hmotnost (délka molekulového řetězce) ovlivňuje mechanické vlastnosti plastů, čím je molekulová hmotnost větší, tím jsou mechanické vlastnosti lepší. Překážkou ale je, že se zpracovatelnost s příliš dlouhými molekulami zhoršuje, tedy i svařovatelnost plastů. Např. vysokomolekulární acetát se bude daleko hůře svařovat ve srovnání s normálním. Při velmi vysoké molekulární hmotnosti se může materiál, který je normálně svařitelný, stát naprosto nesvařitelným (např. polyetylén).

### 3.2.3 Stabilita ve fázi tání

Existují termoplasty, jejichž chemická stabilita je ve fázi tání omezena na malou teplotní oblast. Takovým materiálem je např. tvrdý PVC. U těchto materiálů se doporučuje věnovat velkou pozornost konstrukci dílu, který má být svařován a výběru svařovacího stroje.

## 3.3 Plasty vhodné pro svařování ultrazvukem

Jako zásada by mělo platit, že plast je svařitelný pouze s plastem stejným. To znamená, že pro docílení optimálních výsledků svařování je třeba, aby díly, které se mají spojit, byly vyrobeny ze stejného druhu materiálu a ze stejného typu materiálu. To také platí pro všechny semikrystalické plasty.

U amorfních plastů existují v praxi zvláštní případy svařování odlišných druhů plastů s poměrně dobrými výsledky. Jako příklad lze uvést: ABS s PMMA, ABS s PVC, PMMA s PVC.

Pokusy o svařování semikrystalických plastů s amorfními nevedly k použitelným výsledkům. Výjimku představují speciální polymerové směsi, které lze svařovat jak s krystalickými tak amorfními základními materiály.

Aby mohl být vytvořen dobrý svarový spoj, musí být svařované plastové díly vyrobeny jako vhodné pro svařování ultrazvukem. Značný vliv přitom mají některé charakteristiky výroby, jako např.: vlhkost, podmínky při vstřikování, skladování mezi výrobními operacemi, použité antiadhezní prostředky, dělicí prostředky, použitá plniva, použitý regenerát.

### Vlhkost

Navlhavé plasty (polyamidy) by se měly před svařováním vysušit, jinak pevnost svarového spoje klesá až o 50 %. Výsledkem jsou dlouhé doby svařování a velmi porézní

svarový spoj. V praxi je však obtížné zajistit vysušení vystříknutého výrobku před svařováním do montážní sestavy, proto by se měly čerstvě stříkané díly ihned vzduchotěsně zabalit.

### **Podmínky vstřikování**

Již samotné tvarování polotovaru má výrazný vliv na následné svařování ultrazvukem. Dimenzování nástroje a podmínky vstřikování mají tím velký význam. Patří sem:

- rozměrové tolerance a smršťení
- kolísavá homogenita a plnění
- propadliny a nedostatečná rovnoběžnost na spojové ploše
- nadměrné vnitřní pnutí

### **Skladování mezi výrobními operacemi**

Na rozdíl od amorfních plastů, které lze bezprostředně po vstřikování dále zpracovávat, by měly být semikrystalické plasty před svařováním alespoň 24 hodin skladovány.

### **Dělicí prostředky**

Spojovaná plocha musí být před ultrazvukovým svařováním čistá, příp. očištěná, neboť maziva jako jsou vosky, antiadhezní přípravky a jiné nečistoty negativně ovlivní průběh svařování.

### **Plniva**

Svařitelnost výrazně zlepšují skelná vlákna nebo skleněné kuličky, protože zvyšují tuhost a E-modul materiálu, snižují schopnost tlumení. Tím je příznivě ovlivněna vodivost zvuku a v důsledku toho i svařitelnost těchto materiálů. Jejich podíl by však neměl přesáhnout 35%. Pak by byl účinek zcela opačný – výsledkem by byla malá pevnost švu, křehkost a náchylnost k prasklinám. Všechna ostatní plniva ovlivňují svařitelnost více nebo méně negativně. Platí to pro minerály jako je moučka z břidlice, dále pro azbest, dřevěnou moučku, celulózu, pro barvicí pigmenty a pro prostředky zamezující přilnutí horké plastové taveniny k formě. V neposlední řadě i pro příměsi sazí, které se přidávají pro UV-stabilitu.

### **Regeneráty**

Regeneráty nepředstavují pro svařování ultrazvukem žádnou překážku, pokud jejich

obsah nepřekročí 30%. Při překročení této hranice, ale také při vícenásobném přetavení regenerátu, je svařitelnost horší a zhorší se i očekávaná pevnost svarových spojů.

### 3.4 Vlastnosti tavenin plastů

Jak již bylo výše uvedeno, zvýšení teploty plastu v důsledku svařování ultrazvukem vede k poklesu mezimolekulárních vazebných sil což způsobuje tavení plastů.

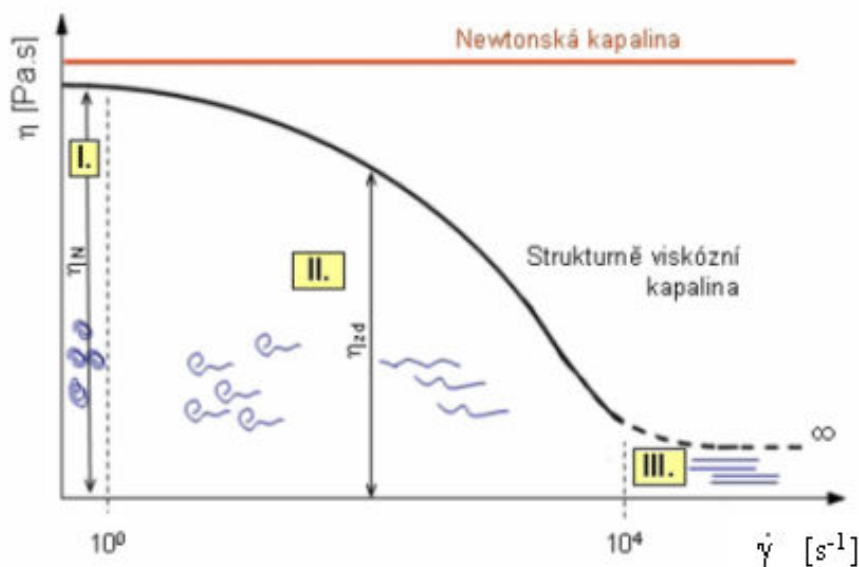
#### 3.4.1 Pohyb makromolekul [ 1 ]

Makromolekuly polymerů nejsou nehybnými částicemi, nýbrž vykonávají neustálý pohyb závislý na teplotě, nazývaný Brownův pohyb. Pohyb se může týkat makromolekul jako celku nebo jen jejich částí (segmentů) a podle toho se rozděluje na:

1. *Brownův makropohyb*, při němž makromolekuly mění vzájemnou polohu jedna vůči druhé jako celek anebo se pohybují jejich shluky. Tento pohyb je charakteristický hlavně pro hmoty v roztaveném stavu.
2. *Brownův mikropohyb* představuje jen pohyb určitých částí makromolekul, kdy segmenty vykonávají kmitavý nebo rotační pohyb kolem střední polohy, zatímco vzájemná poloha sousedních molekul se nemění. Tohoto stavu se dosáhne zchlazením hmoty (taveniny) vykazující Brownův makropohyb pod určitou charakteristickou teplotu.

#### 3.4.2 Tok polymerních tavenin [ 1 ]

Taveniny plastů patří mezi nenewtonské kapaliny, které vykazují závislost viskozity na smykové rychlosti. Se zvyšujícím se smykovým napětím (smykovou rychlostí) klesá dynamická viskozita tavenin termoplastů. Takovéto kapaliny nazýváme strukturně viskózní nebo pseudoplastické. Tento charakter tokového chování lze vyjádřit graficky tzv. *křivkou viskozity* stanovenou pro konstantní teplotu taveniny (obr. 3-2).



Obr. 3-2 Závislost dynamické viskozity tavenin polymerů na smykové rychlosti [1]

V tavenině makromolekuly zauímají tvar volně sbalených klubíček. Při velmi malých smykových rychlostech (asi do  $\dot{\gamma} = 1 \text{ s}^{-1}$ ) lze považovat viskozitu za konstantní, rovnou maximální newtonské viskozitě  $\eta_N$ . Taveniny polymerů mají amorfni strukturu a makromolekuly zauímají tvar příslušející maximální entropii systému – volně sbalených klubíček. Při toku nastává přemísťování klubíček jako celku – oblast  $\eta_N$ . Zvyšováním smykové rychlosti dochází k poklesu viskozity a označujeme ji jako zdánlivou  $\eta_{zd}$ . Její hodnota je dána podílem aktuálních hodnot smykového napětí  $\tau$  a smykové rychlosti  $\dot{\gamma}$ . Pokles viskozity lze vysvětlit rozvinováním makromolekul klubíček do směru toku. Více nebo méně rozbalené makromolekuly se pohybují snadněji, což se projevuje poklesem zdánlivé viskozity  $\eta_{zd}$ . V případě extrémně vysokých smykových rychlostí se viskozita opět stává nezávislou na smykové rychlosti a je označována jako viskozita při nekonečném smyku  $\eta_\infty$ . Jedná se o případ, kdy by došlo k dokonalému rozbalení všech makromolekul a ty by se pohybovaly po sobě jako nitkovité útvary. Tohoto stádia však u tavenin plastů nelze v praxi dosáhnout, protože dříve u nich nastává chemický rozklad molekul.

V oblasti středních a vyšších smykových rychlostí, tedy v oblasti zdánlivé viskozity, lze u polymerních tavenin popsat závislost smykového napětí na smykové rychlosti tzv. mocninovým vztahem:

$$D = \Phi \cdot \tau^m \quad (3.1)$$

kde  $\Phi$  – je koeficient tekutosti a odpovídá smykové rychlosti při jednotkovém smykovém napětí,

$m$  – je exponent mocninového zákona, vyjadřující velikost odchylky tokového chování taveniny polymeru od chování newtonské kapaliny. Je větší než 1.

Mocninový zákon v praxi dobře vyhovuje, ale veličina  $\Phi$  nemá rozměr reciproké hodnoty dynamické viskozity. Reciprocita platí jen u newtonských kapalin, kde  $m = 1$ . Proto byl vztah upraven:

$$D = \Phi \cdot \left( \frac{\tau}{\tau_0} \right)^m \quad (3.2)$$

kde  $\tau_0$  je jednotkové smykové napětí, které má stejný rozměr jako  $\tau$  a tím se rozměr ( $N \cdot m^{-2}$ ) vyruší. Rozměr  $\Phi$  je pak  $s^{-1}$ .

Dynamickou viskozitu taveniny však neovlivňuje pouze smyková rychlost, ale vliv má i teplota a tlak. S rostoucí teplotou taveniny se hodnota zdánlivé dynamické viskozity za konstantní smykové rychlosti snižuje a stejně je tomu i v případě působení tlaku.

Teplem plastifikované svařované oblasti vykazují krátce před teplotním rozkladem materiálu nejnižší viskozitu. Proto by se mělo při svařování usilovat o dosažení pokud možno nejlepších tokových vlastností.

V rámci zadání disertační práce byly zkoušeny vláknové kompozitní materiály.

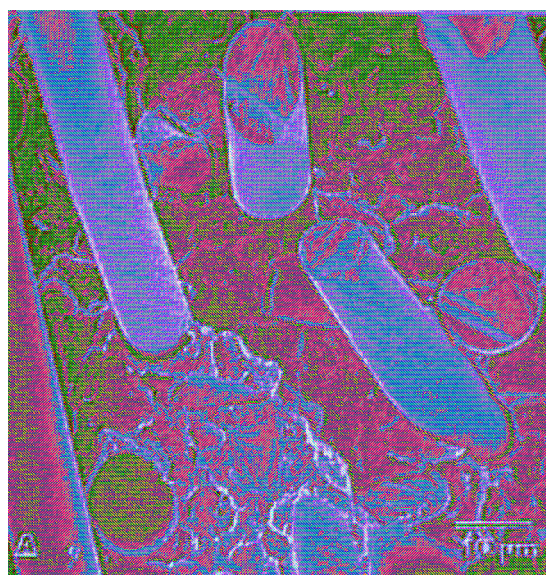
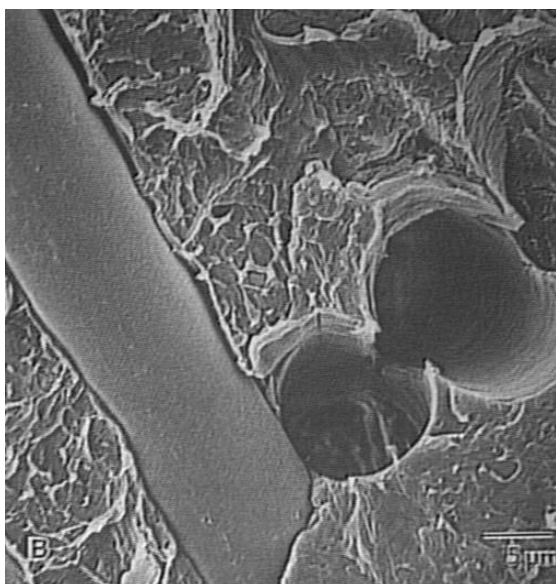
### 3.5 Polymerní vláknové kompozity [ 4, 13, 14, 15, 16 ]

Polymerní kompozity jsou heterogenní uměle vytvořené materiály, které se skládají minimálně ze dvou hlavních fází, které se vzájemně výrazně liší svými fyzikálními, chemickými i mechanickými vlastnostmi. Kombinací dvou a více fází s rozdílnými vlastnostmi lze získat materiály nové, jejichž výsledné vlastnosti jsou lepší než by odpovídalo pouhému součtu vlastností jednotlivých složek (synergický efekt).

Tyto fáze jsou :

- pojivo ( matrice ) – spojitá fáze, která udržuje vyztužující vlákna v požadované poloze, zajišťuje přenos sil mezi všemi vyztužujícími vlákny a dává materiálu potřebné fyzikální a chemické vlastnosti (elektroizolační a tepelné vlastnosti, chemickou odolnost apod.), chrání vlákna před vnějšími vlivy a přemostňuje trhliny, určuje tvar a rozměry kompozitu.
- vyztužující vlákna ( diskontinuitní fáze ) – dodávají pevnost a tuhost a blokují vznik a růst trhlín ve struktuře.

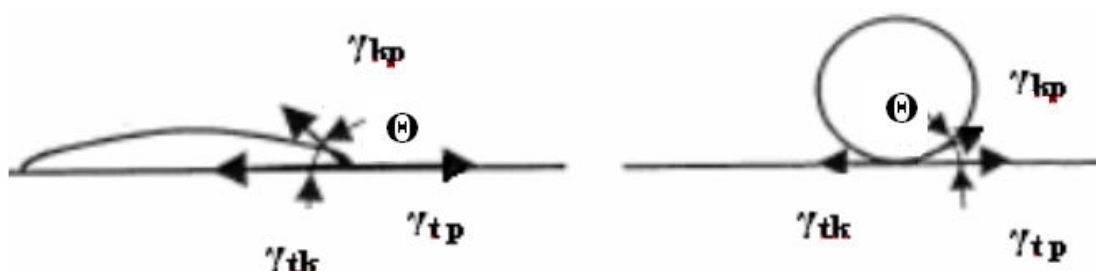
Vyztužující vlákna, která mají vyšší tuhost a pevnost v porovnání s matricí, se tak při vnějším namáhání deformují méně než polymer. V důsledku toho dochází ke vzniku smykových sil na rozhraní vlákno - matrice. Vlastnosti tenkých vrstev na tomto rozhraní určují velikost přenosu napětí z matrice do vláken a odolnost celé kompozitní struktury vůči působení okolního prostředí. Heterogenní oblast tohoto rozhraní se nazývá *mezifáze*. Ta má odlišné jak fyzikální, tak chemické vlastnosti od vlastností matrice i výztuže. V důsledku nárůstu objemového podílu vláken v matrici vzrůstá význam hraničních vrstev (mezifází). Při objemovém podílu vláken kolem 50 - 70 % je vliv mezifáze na mechanické vlastnosti kompozitu dominantní. Nedostatečnou adhezí dojde ke ztrátě vyztužujícího efektu, což má za následek snadné poškození kompozitního materiálu (obr. 3-3).



Obr. 3-3 Struktura PP se skelným vláknem s nedostatečnou adhezí – vlákno se vytahuje [25]



Mají-li být vlákna dokonale obklopena matricí, je nutné aby při přípravě kompozitu došlo k dobrému smáčení vláken, tj. aby při vysoké energii volného povrchu vláken měla kapalná matrice co nejmenší povrchovou energii (obr. 3-4) [ 4 ]. Vlákna se proto na povrchu chemicky upravují tak, aby se na rozhraní mezi matricí a vláknem vytvořily pevné chemické vazby. Jsou opatřena lubrikační a apreturní vrstvou. Skelná vlákna je třeba vždy chránit povlakem (ke zmenšení citlivosti na zpracování a vlhkost). Je třeba volit taková chemická činidla, která reagují jak se skelným povrchem, tak s matricí, a vytvoří spojitě molekulární mosty z jedné fáze do druhé [ 16 ].



Obr. 3-4 Znáznornění povrchových energií a úhlu smáčivosti  $\Theta$  u kapky kapalné matrice na tuhém povrchu – vlevo dobré smáčení, vpravo – dokonalá nesmáčivost [4]

Úhel  $\Theta$  na obr. 3-4 je tzv. úhel smáčení a lze jej stanovit:

$$\cos \Theta = \frac{\gamma_{tp} - \gamma_{tk}}{\gamma_{kp}} \quad (3.3)$$

kde:  $\gamma_{tp}$  je povrchová energie napětí na rozhraní tuhé a plynné fáze

$\gamma_{tk}$  je povrchová energie rozhraní tuhé a kapalné fáze

$\gamma_{kp}$  je povrchová energie rozhraní kapaliny a plynu

Jestliže je kontaktní úhel velmi malý, tj. hodnota  $\cos \Theta$  se blíží k jedné, kapalná fáze dobře smáčí podklad.

Vláknové kompozity lze zhruba třídit na *jednovrstvé* a na *mnohovrstvé*. Jednovrstvé kompozity mohou být ve skutečnosti zhotoveny z několika samostatných vrstev, z nichž

každá má stejnou orientaci a stejné vlastnosti (laminát lze uvažovat za jednovrstvový kompozit). Každá vrstva je jednovrstvý kompozit a tato orientace se střídá podle konstrukčního návrhu. Vyztužovací vlákna v jednovrstvovém kompozitu mohou být krátká nebo dlouhá vzhledem k jejich průřezovým rozměrům. Spojitá vlákna v jednovrstvovém kompozitu mohou být všechna uspořádána pouze v jednom směru a potom je vytvořen jednosměrový kompozit. Příkladem takového materiálu je dále uváděný *CELSTRAN* (kap.3.6.2).

### 3.5.1 Plniva [ 1 ]

Plniva mohou významným způsobem změnit mechanické vlastnosti, ovlivnit fyzikální vlastnosti, chemickou odolnost. Jsou buď anorganického nebo organického původu a používají se jako částicové plnivo nebo jako vlákna různých délek. K nejdůležitějším patří vlákna skelná, uhlíková a kovová. Přítomnost plniv se projevuje zvýšením především modulu pružnosti a pevnosti v tahu, silně snižují tažnost a rázovou houževnatost. Sklon ke creepu je nižší. Tvarová stálost za tepla roste a teplotní roztažnost se zmenšuje. Dielektrické vlastnosti se zhoršují, hustota roste a tekutost se zhoršuje. Typ plniva a jeho obsah v polymerní matrici patří k prvkům ovlivňujícím svařitelnost polymerů ultrazvukem.

### 3.5.2 Vláknitá plniva

Podle délky vlákna se vláknové kompozitní materiály dělí na:

- *krátkovláknové* (vyztužené diskontinuitními vlákny) a na *dlouhvláknové* (vyztužené spojitými vlákny - označované LFRT – long fiber reinforced thermoplastics).

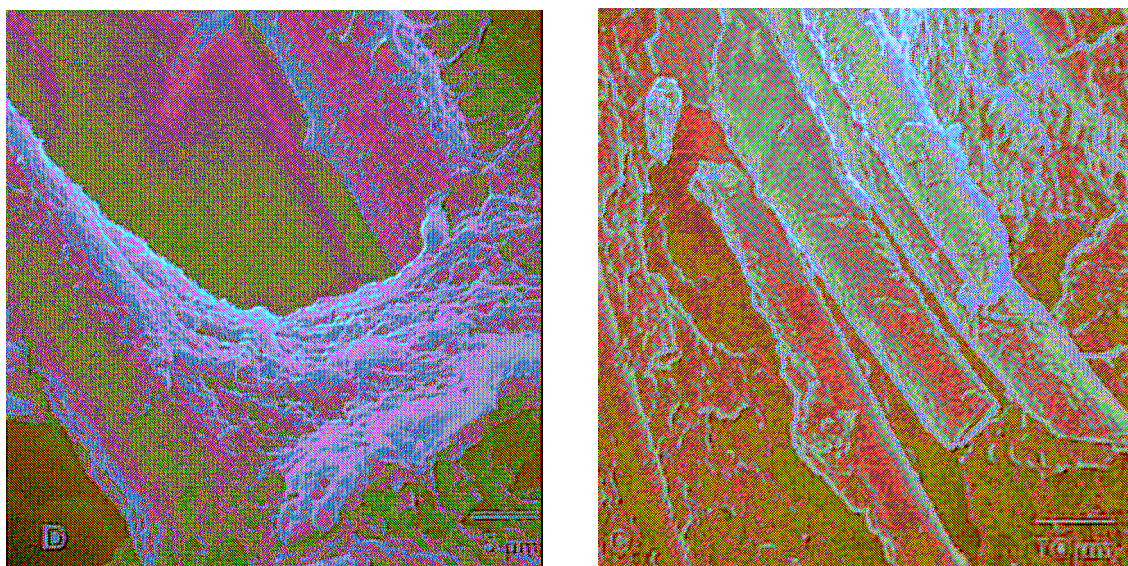
Nejrozšířenějšími (cca 90%) vyztužujícími vlákny pro kompozitní materiály jsou vlákna skelná (obr. 3-5), která mají velmi dobré mechanické vlastnosti, ale i relativně nízký modul pružnosti (ve srovnání např. s uhlíkovými, grafitovými vlákny) a jsou poměrně křehká. Zvyšují tepelnou vodivost  $\lambda_t$ , snižují teplotní roztažnost tím více, čím jich je vyšší % v matrici. Materiály dalších vyztužujících vláken jsou vlákna – uhlíková (dodávají kompozitům vysokou tuhost), aramidová (KEVLAR – umožňují, aby kompozity odolávaly rázům), ocelová, beryliová, vlákna z nerezové oceli, přírodní na bázi celulózy, čedičová apod.

Obecně platí, že mechanické vlastnosti kompozitu stoupají se zvyšujícím se obsahem vyztužujících složky až do podílu 80 %. Optimální množství vláken je cca okolo 40 %.

Při aplikacích kompozitních materiálů v automobilovém průmyslu je úkolem výztuže zajistit výslednému tvaru požadovanou pevnost a tuhost, naproti tomu polymerní matrice zajišťuje jeho kompaktnost a tvarovatelnost. Proto je u těchto materiálů možné využít současně předností vláknitých materiálů, jako je jejich vysoká pevnost a tuhost při relativně nízké měrné hmotnosti, se snadnou zpracovatelností, která je charakteristická pro materiály polymerní. Vytvářením kompozitních systémů tak mohou být příznivě ovlivňovány vlastnosti, jako jsou mechanická pevnost, tuhost, odolnost proti korozi, odolnost proti opotřebení, hmotnost, únavová pevnost, vrubová houževnatost, tepelná odolnost, tepelná vodivost a roztažnost, zvuková vodivost apod.

Vláknové polymerní kompozitní materiály jsou používány pro svou nízkou hustotu při zachování vysokých hodnot pevnosti a tuhosti.

Na obr. 3-5 je uvedena struktura materiálu Celstran PP se skelným vláknem. Obrázek ukazuje dobrou adhezi mezi matricí PP a skelným vláknem.



*Obr. 3-5 Celstran (matrice PP + skleněná vlákna) [ 25 ]*

### 3.6 Charakteristika plastů vhodných pro výrobu kompozitních materiálů

Představu konstrukčního plastu naplňuje takový materiál, který je dostatečně tuhý, pevný a houževnatý. Většinou se požaduje, aby byl materiál přiměřeně tuhý a pevný i při zvýšených teplotách prostředí a houževnatý při nízkých teplotách. Vysokou tuhost, pevnost a

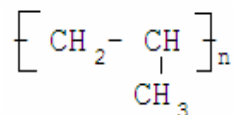
houževnatost si musí materiál podržet i v čase, při dlouhodobém zatížení konstantní nebo časově proměnnou silou. Vysoká houževnatost se dále požaduje při očekávaném rázovém zatížení nebo při náhodném krátkodobém přetížení výrobku. Při nárazu musí materiál absorbovat z vnějšku vnesenou energii. Dobrý konstrukční materiál by měl být výhodný i z hlediska nízké hmotnosti, nízké ceny a dobré zpracovatelnosti.

Mezi konstrukční termoplasty můžeme zařadit PP plněný dlouhými skleněnými vlákny.

### 3.6.1 Polypropylen [ 1, 5, 9, 10, 14 ]

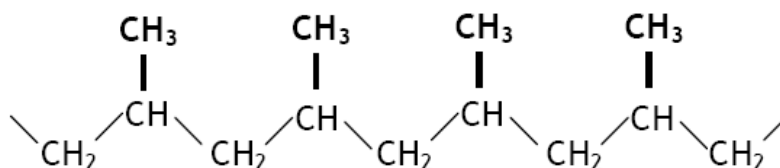
Polypropylen (PP) patří do skupiny polyolefinů, jde o semikrystalický termoplast s krystalinitou mezi 50 až 70%. Jedná se o nejlehčí kompaktní polymer ( $\rho = 900 \div 910 \text{ kg/m}^3$ ). Je odolný vůči únavě materiálu, má dobrou chemickou odolnost (není odolný pouze proti silným oxidačním prostředkům za vysokých teplot) a velmi dobré elektroizolační a dielektrické vlastnosti, má vyšší teplotní odolnost a tvarovou stálost za teplot v intervalu  $60 \sim 70^\circ \text{C}$ . Má prakticky nepolární strukturu, což umožňuje zpracování granulátu bez předcházejícího sušení (zpracovává se především vstřikováním a extruzí). Teplota tání čistého izotaktického polypropylenu je  $176^\circ \text{C}$ , obchodních produktů v rozmezí od  $160^\circ \text{C}$  do  $170^\circ \text{C}$ . Má menší odolnost vůči mrazu a povětrnosti, téměř nepropouští plyny a páry.

Základní stavební jednotkou u propylenu je skupina:



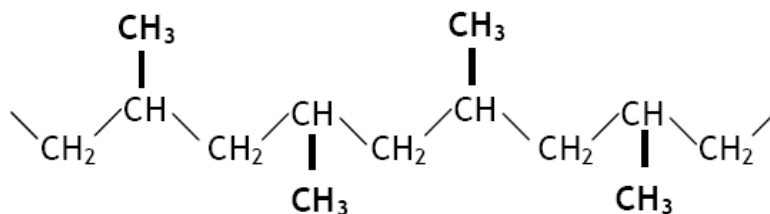
Tyto základní stavební jednotky mohou být v makromolekule polypropylenu ve třech základních konfiguracích, které člení polypropylen do tří skupin - na PP izotaktický, syndiotaktický a ataktický.

*Izotaktický* - u kterého jsou postranní methylové skupiny orientovány soustavně po jedné straně hlavního řetězce.



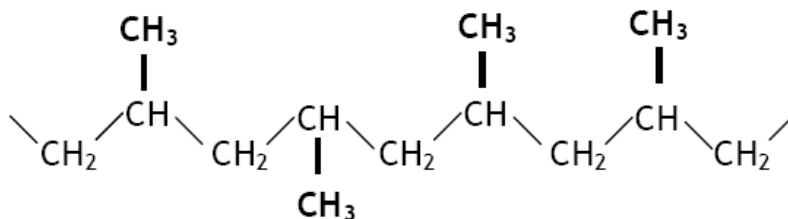
Obr. 3-6 Izotaktický polypropylen

*Syndiotaktický* - u kterého jsou postranní methylové skupiny situovány střídavě po obou stranách řetězce.



Obr. 3-7 Syndiotaktický polypropylen

*Ataktický* - zde jsou postranní methylové skupiny umístěny rovněž po obou stranách hlavního řetězce, ale bez jakékoliv pravidelnosti.



Obr. 3-8 Ataktický polypropylen

Pravidelnost molekulárního řetězce podmiňuje nadmolekulární uspořádání, jmenovitě rozhoduje o schopnosti materiálu krystalizovat, a tím také o makroskopických vlastnostech materiálu. Nejvýhodnější vlastnosti vykazují izotaktické a syndiotaktické polymery. Ataktický podíl zhoršuje mechanické vlastnosti PP. Fyzikální a zpracovatelské vlastnosti PP jsou dané převážně molekulovou hmotností a v případě kopolymerů také typem a množstvím použitého komonomeru.

Polymery, jejichž makromolekuly obsahují jen jeden druh monomerních jednotek se označují jako *homopolymery*.

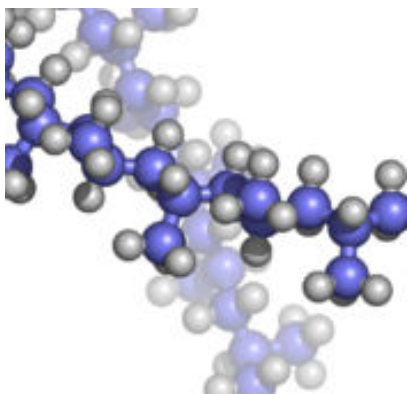
*Homopolymer (PP-H)* – je vyráběn polymerací propylenu na stereospecifických katalyzátorech. Oproti kopolymerům je tužší, má lepší odolnost při vysokých teplotách. Rázová odolnost při záporných teplotách je omezená.



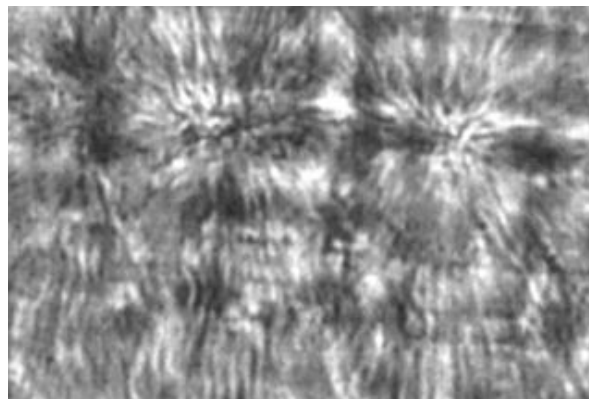
U polymerů, kde se tvorby zúčastní dva nebo více monomerů a pak hovoříme o kopolymeraci a výsledný produkt se nazývá *kopolymer*. Vlastnosti kopolymerů závisí na druhu monomerů, jejich vzájemném poměru a na uspořádání v makromolekule (statistický, střídavý, sledový a roubovaný kopolymer).

*Statistický kopolymer* (random copolymer – PP-S) – do makromolekulárního řetězce tvořeného propylenovými jednotkami jsou zcela nepravidelně a nahodile vestavěny molekuly ethylenu (max. 5%). Přítomnost ethylenu v polymerním řetězci redukuje tendenci krystalizovat, zvyšuje rázovou houževnatost, zajišťuje větší rozsah tepelné stability a vylepšuje optické vlastnosti. Díky nižší krystalinitě mají kopolymery nižší bod tání a hustotu než homopolymery PP.

*Blokový kopolymer* (impact copolymer – PP-B) – je kopolymer propylenu s ethylenem, přičemž polypropylenové a polyethylenové makromolekuly se skládají z bloků (sledů). Obsah ethylenové složky je výrazně vyšší než u statistického kopolymeru (max. do 30%). Kopolymerizovaná část má „gumovitý“ charakter a tvoří odlišnou fázi oproti polymerní matici. Má vyšší tuhost a rázovou odolnost při nízkých teplotách, ale dochází ke zhoršení transparentnosti a bodu měknutí.



Obr. 3-9 Model syndiotaktického polypropylenu [36]



Obr. 3-10 Morfologie PP - sférolity ve tvaru maltézských křížů [36]

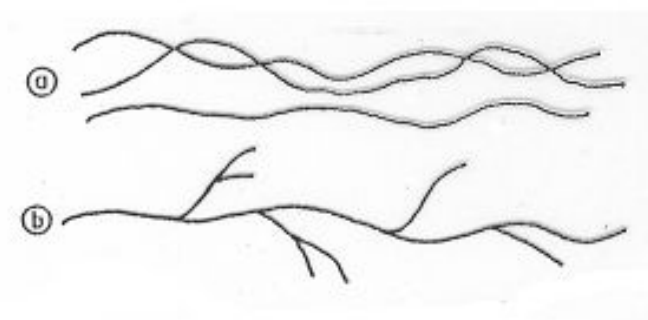
Polypropylen může být:

- *lineární* – nejjednodušší tvar, který odpovídá hladkému řetězci. Z termodynamických důvodů však nemají tvar rovné nitky, ale jsou stočeny do klubička nebo obecně se snaží zaujmout takový tvar, kterému přísluší maximální entropie. Lineární makromolekuly se mohou z prostorových

důvodů více přiblížit jedna k druhé a vyplnit tak prostor kompaktněji. Polymery mají pak vyšší hustotu, poměrně snadno krystalizují. Plasty s lineárními molekulami jsou obvykle dobře rozpustné a tavitelné, v tuhém stavu houževnaté a ve formě tavenin dobře zpracovatelné.

- *rozvětvené* (přechodový stav k zesítnění) - makromolekuly obsahují buď v pravidelných anebo statisticky rozdělených vzdálenostech kratší či delší boční řetězce. V důsledku těchto bočních řetězců se rozvětvené makromolekuly (na rozdíl od lineárních makromolekul) nemohou k sobě dostatečně přiblížit, a proto se polymery vyznačují nižší hustotou a hůře krystalizují.

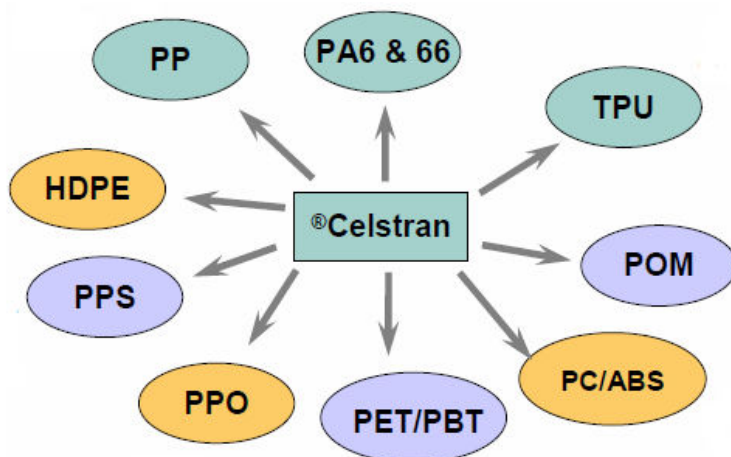
V technických polymerech se prakticky vždy vyskytují vedle lineárních řetězců i makromolekuly částečně rozvětvené. Počet rozvětvení není nikdy tak velký, aby lineární charakter polymeru byl zásadně porušen.



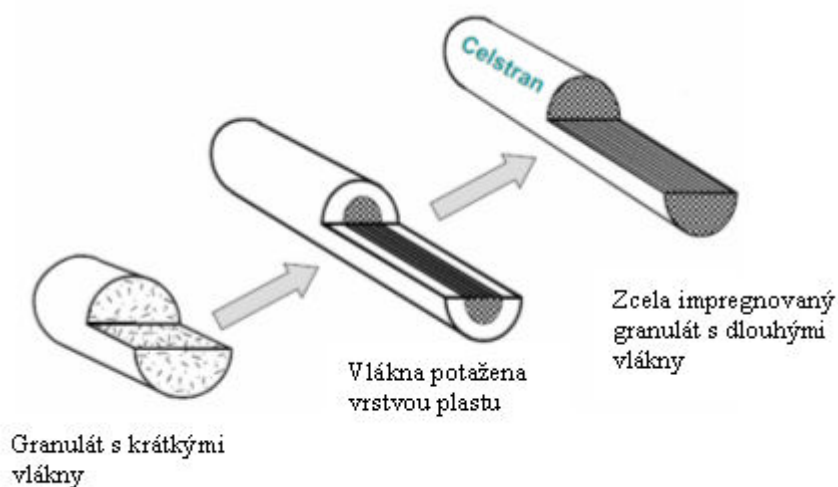
Obr. 3-11 Makrostruktura polymerních řetězců  
(a-lineární, b-rozvětvená)

### 3.6.2 Celstran s PP matricí [ 25 ]

Celstran LFRT (long fiber reinforced thermoplastics) je dlouhoválnový kompozitní materiál s polymerní matricí plněný dlouhými vlákny, který se vyrábí pultruzí (viz kap. 3.6.2.1), díky níž nedochází k degradaci vláken. Nejčastěji používanou polymerní matricí je polypropylen nebo polyamid. Jako plniva se používají – skelná, aramidová, uhlíková vlákna, nebo vlákna z ušlechtilé oceli, jejichž podíl může být 10 - 60%.



Obr. 3-12 Používané polymerní matrice u Celstran [26]



Obr. 3-13 Schéma vývoje granulace od krátkovláknových kompozitů až po dlouhovláknité granuláty [25]

Celstran má velmi dobrou zpracovatelnost, vynikající fyzikálně-mechanické vlastnosti. V porovnání s PP plněným krátkými vlákny má Celstran zřetelně lepší mechanické vlastnosti, vysokou vrubovou a rázovou houževnatost až do teplot  $-30^{\circ}\text{C}$ , vysokou odolnost proti mechanickému poškození (praskliny, trhliny), tuhost se při zvýšených teplotách snižuje



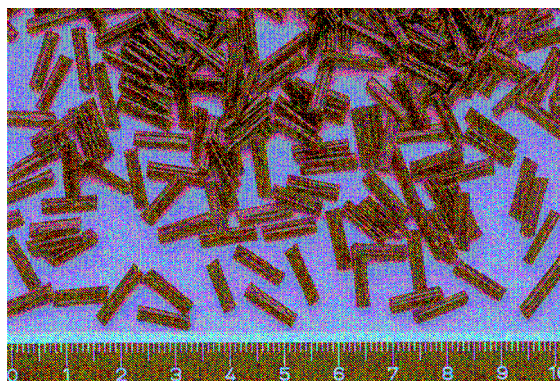
nepatrně, zvýšenou odolnost proti otěru, sníženou únavu při dynamickém namáhání, vysokou stabilitu a přesnost tvaru s minimální deformací po tváření, velmi dobrou odolnost při vysokých teplotách a proti vlhkosti.

Zpracovává se vstřikováním, vyfukováním a vytlačováním. Při zpracování je nutno věnovat pozornost minimalizaci degradace vláken (viz kap.3.7.1).

Vyrábějí se z něj řadící páky, posuvné střechy a vodní žlábký, dále díly z oblasti motoru, které musí být odolné vyšším teplotám i rázům, kryty elektromotoru nebo kryty chladiče.



Obr. 3-14 Přístrojová deska – termoplast s dlouhými skelnými vlákny [25]

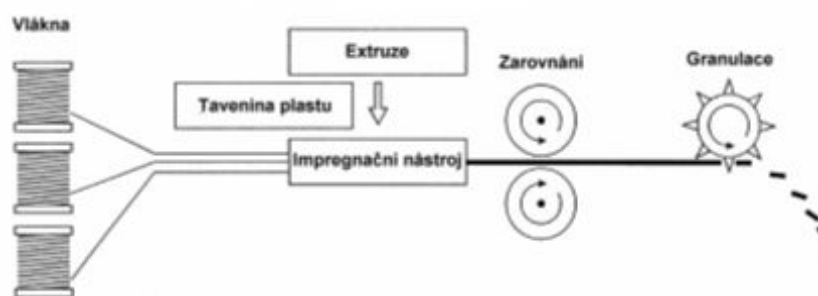


Obr. 3-15 Ukázka granulí s PP matricí (vlevo) a provázání vláken po vytavení matrice z granulí Celstranu +PP-GF45 (vpravo)

### 3.6.2.1 Pultruze

Je proces kontinuální výroby vyztužených plastů různých tvarů a délek. Tato technologie je založena na tažení svazků vyztužujícího materiálu přes vyhřívanou ocelovou formu pomocí tažného zařízení. Tato vlákna navinutá na cívkách jsou vedena do srovnávače, jehož úkolem je tyto vlákna rovnoměrně rozložit v průřezu. Vlákna jsou vedena taveninou plastu, kde dochází k jejich prosycení. Dále se prosycená vlákna sbíhají do předtvarovací formy, kde dojde ke konečnému zformování profilu. Nakonec je profil rozřezán na požadovanou délku. Celý proces výroby musí být přesný a plynulý, aby se docílilo vysoké přesnosti bez poškození vláken.

Na rozdíl od běžných způsobů výroby vyztužených termoplastů zajišťuje pultruze rovnoměrné pokrytí vláken a distribuci polymeru.



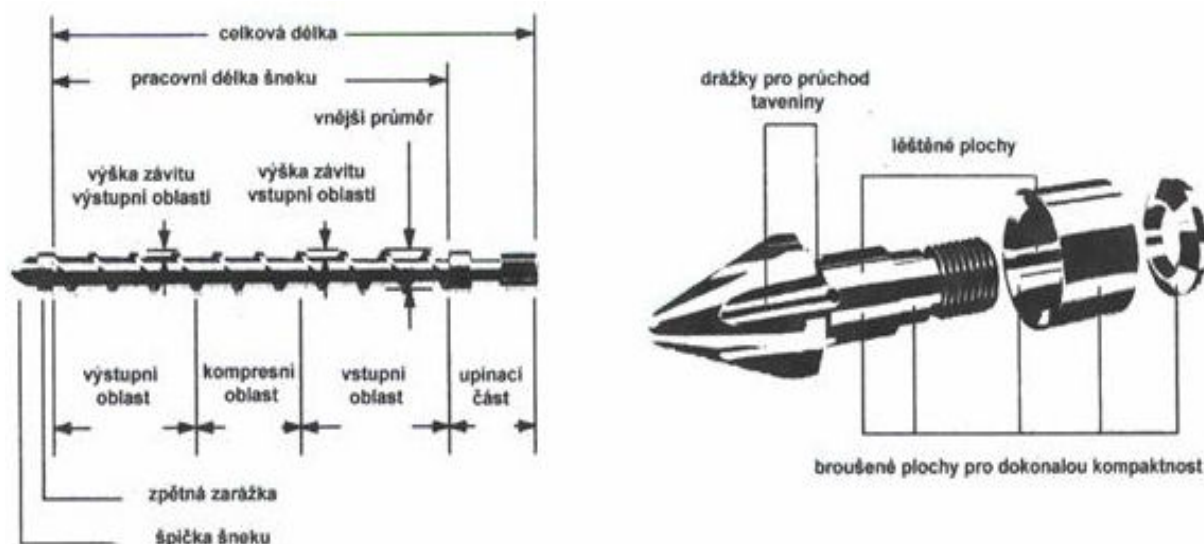
Obr. 3-16 Schéma výroby materiálu CELSTRAN

## 3.7 Vliv technologických podmínek vstřikovacího procesu [ 5, 10, 15, 17 ]

Zkušební vzorky použité při experimentech byly vyrobeny technologií vstřikování. Podmínky pro vstřikování dlouhoválnových kompozitů jsou popsány v následující kapitole. Z hlediska této disertační práce jsou detailněji popsány zejména průvodní jevy orientace makromolekul a plniva, anizotropie. Tyto jevy podstatně ovlivňují svařitelnost materiálů a poté především pevnost svarového spoje.

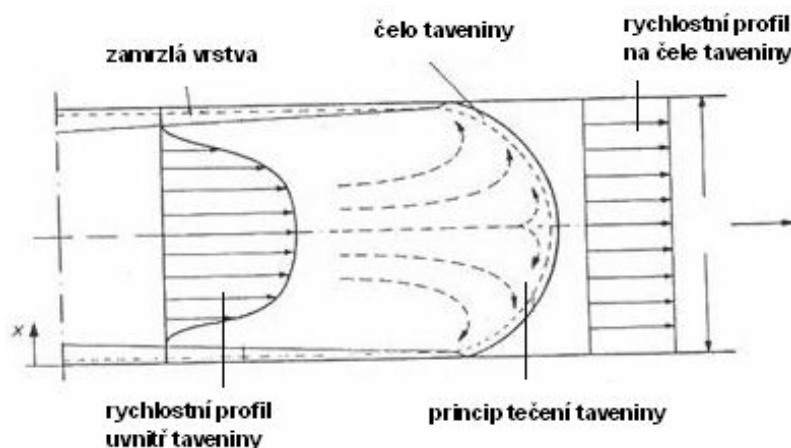
### 3.7.1 Vstřikování termoplastů plněných dlouhými vlákny

Termoplasty plněné dlouhými vlákny mají díky netavitelnému podílu anorganického materiálu v plastickém stavu větší vnitřní tření taveniny než neplněné plasty. Ke vstřikování jsou nezbytné teploty nejméně o 10 °C vyšší. Rovněž tlaky, teplota formy a rychlost vstřikování jsou doporučovány vyšší, neboť taveniny plněných termoplastů rychle tuhnou a nedoporučuje se vyrábět díly s tloušťkou menší než 2 mm. Při zpracování (šnekování, plastikaci) dochází k rozlámání granulí, ale i přes tento nedostatek jsou výsledná vlákna mnohem delší než u materiálů s krátkými vlákny. Proto se plastikace musí provádět velmi šetrně speciálně vyrobeným šnekem, který se může otáčet oběma směry (obr. 3-17).



Obr. 3-17 Šnek pro plastifikaci dlouhvláknových kompozitů [ 5 ]

**Proces plnění dutiny formy** - vlastní proces plnění dutiny formy rozhoduje o vlastnostech budoucího výrobku. Je vyžadováno plnění formy taveninou laminárním tokem (obr. 3-18). Tavenina při styku s formou okamžitě tuhne a vytvoří vrstvu nepohyblivé hmoty a zároveň tepelné izolace. Uvnitř je plastické jádro s nízkou viskozitou, umožňující další průtok taveniny plastu do formy, která se následně roztéká směrem ke stěnám, až dojde k naplnění dutiny formy. Vzhledem ke zvyšování viskozity od středu tvarové formy ke stěnám se projevuje na vyšší rychlosti v plastickém jádru a výsledkem je zakřivení čela taveniny. Tlak klesá směrem k formě.



Obr. 3-18 Laminární tok taveniny plastů [ 5 ]

Plnění formy je tedy provázeno rychlými změnami tlaku, teploty a viskozity taveniny. Mají za následek nehomogenitu a nerovnoměrnost struktury, orientaci, anizotropii, vnitřní pnutí atd. Tomu se dá do značné míry zabránit vhodným tvarem výstřiku.

**Orientace makromolekul** - při krystalizaci polymeru bez přítomnosti vnějších sil jsou krystalinity uspořádány zcela náhodně a neexistuje převládající směr, do kterého by byly polymerní řetězce uspořádány. Orientace makromolekul nastává při dodatečném působení vnějších sil – např. při vstřikování.

Princip vstřikování je v tom, že rychle chladnoucí viskózní tavenina se protlačuje vysokým tlakem úzkými kanálky a průřezy ve formě, nepravidelně zkroucené makromolekuly se vysokým smykovým napětím narovnávají ve směru toku taveniny a v této poloze ztuhnou. Čím více jsou makromolekuly paralelně srovnány vedle sebe, tím vyšší je stupeň orientace. Výsledkem orientace je anizotropie vlastností. Jestliže smykové napětí vyvolávající orientaci přestane působit dříve než tavenina ztuhne, snaží se narovnané makromolekuly zaujmout ihned zase svoji rovnovážnou polohu (dezorientace) a orientace se neobjeví nebo jenom v nízkém stupni.

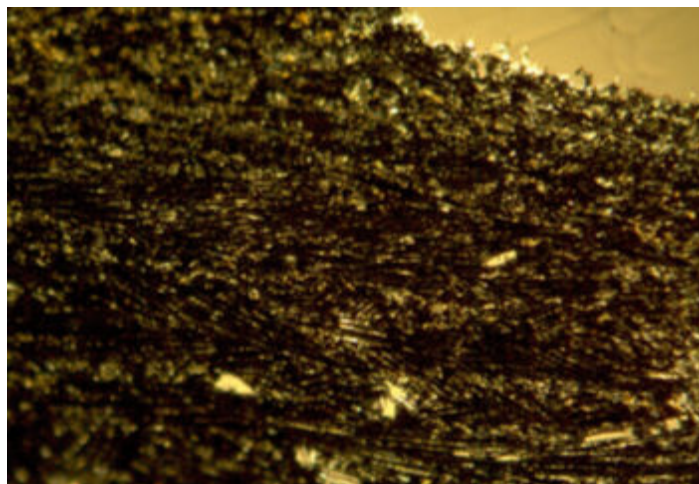
**Pevnost a tažnost.** Čím vyšší je stupeň orientace, tím více roste v tomto směru pevnost a poněkud i modul pružnosti. Tažnost se ve směru orientace naopak snižuje. Stejným způsobem se mění i rázová a vrubová houževnatost, neboť závisí na schopnosti deformace materiálu v určitém směru. Ve směru kolmo na orientaci klesá pevnost v tahu.

*Zvýšení molekulové hmotnosti* u téhož druhu polymeru zvyšuje tažnost, pevnost v tahu a rázovou i vrubovou houževnatost. Zhoršuje ale tekutost, zvyšuje viskozitu taveniny a tím sklon k orientaci. Oba vlivy působí proti sobě.

*Zvyšování % krystalinity* se zvětšuje hustota, tuhost, napětí na mezi kluzu, tvrdost povrchu, tvarová stálost za tepla a chemická odolnost. Snižuje se tažnost, rázová a vrubová houževnatost a průhlednost.

*Smrštění.* Orientace makromolekul vytváří anizotropii smrštění. Smrštění ve směru toku materiálu bývá jiné než ve směru kolmém, rozdíl závisí na materiálu a na vstřikovací teplotě.

***Orientace plniva a anizotropie*** - charakteristickým rysem kompozitů oproti homogenním materiálům je jejich anizotropie - vlastnosti kompozitu závisí na směru uložení (orientaci) vyztužujících vláken. Vlákná, použitá k vyztužení termoplastické matrice se při vstřikování narovnávají do směru tečení taveniny a tak lze tvrdit, že se bude jednat o jednosměrový kompozit. Je však nepochybné, že ve velmi tenké vrstvě taveniny plastu, která tuhne při dotyku s chladnou stěnou vstřikovací formy, tedy v povrchové vrstvě, bude orientace vyztužujících vláken nahodilá. Teprve v plastickém jádře, chráněném touto izolující vrstvou, bude docházet k orientaci vláken. To je však také výrazně závislé na tloušťce vstřikovaného dílu. Na druhé straně však lze s výhodou využít umístění vtokového systému a jeho volbou ovlivnit vyztužení jednotlivých částí výrobku vlivem orientace a tečení. V hotovém výrobku se následkem víření taveniny ve formě vyskytují oblasti s různým směrem orientace vláken. Na obr. 3-19 je ukázka struktury s orientací vláken ve směru toku taveniny.



*Obr. 3-19 Vlákná ve směru toku taveniny (36x zvětšeno)*



Že vyšší tuhost a pevnost matrice a vláken povede zpravidla k vyšší tuhosti a pevnosti kompozitu je celkem zřejmé, vyšší tuhost a pevnost kompozitu lze ale očekávat u vláken větší délky. Ve směru orientace vláken roste pevnost a modul pružnosti, ale klesá tažnost. Ve směru kolmém je tomu naopak. Tuhost a pevnost se ve směru vláken a kolmo na ně může lišit až o několik řádů. Proto je nutné s anizotropií kompozitu vždy počítat.

Všechny výše uvedené skutečnosti byly využity při koncepci a řešení experimentů v rámci této disertační práce.

## 4. EXPERIMENTÁLNÍ SVAŘOVÁNÍ VYBRANÝCH TYPŮ PLASTŮ ULTRAZVUKEM

Experimenty této disertační práce byly zaměřeny na sledování svařování plastů se skelnými vlákny. Pro tyto účely byly vybrány plasty, které mají největší uplatnění v automobilovém průmyslu, kde je třeba, aby plasty obsahovaly výztuže a současně byly dobře svařitelné ultrazvukem.

V tabulce 4.1 je uveden přehled použitých materiálů, včetně obsahu plniva – resp. skelného vlákna.

Záměrem experimentálních prací bylo získat poznatky o vlivu technologických parametrů ultrazvukového svařování na pevnost svarového spoje a porovnání výsledků pro různé materiály. Výsledky práce by měly umožnit nalézt optimální nastavování technologických parametrů při ultrazvukovém svařování.

### 4.1 Charakteristika zkoušených materiálů

Při výběru materiálu byl zvolen jako termoplastická matrice vláknového kompozitu jeden z nejčastěji používaných materiálů nejen pro technické účely – polypropylen. Jednalo se o kopolymer CELSTRAN +PP-GF45, který byl hlavním zkoušeným materiálem. K tomuto materiálu byl pro porovnání výsledků zkoušen i kopolymer CELSTRAN +PP-GF30. Pro porovnání pevnosti svarů kompozitních materiálů byl také vybrán polypropylen bez skelných vláken – kopolymer TIPPLEN K199, který se míchá s Celstranem.

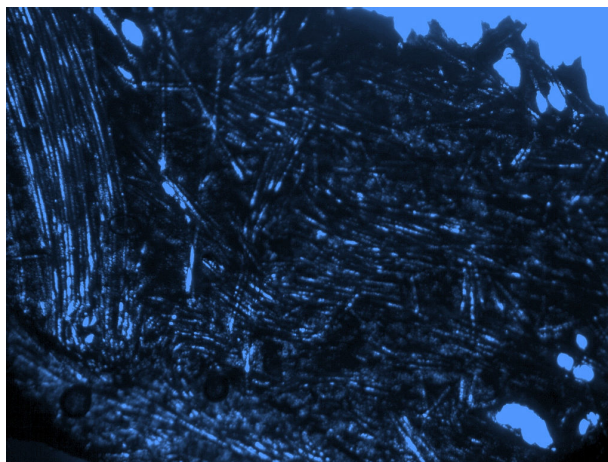
#### 4.1.1 Celstran

Celstran +PP-GF45 a Celstran +PP-GF30 je vyráběn firmou Ticona. Dodává se ve formě cca 10 mm dlouhých granulí černé barvy.





*Obr. 4-1 Granule materiálu  
Celstran+PP-GF45*



*Obr. 4-2 Celstran se skelným vláknem  
(36x zvětšeno)*

#### **4.1.2 Polypropylen**

Polypropylen je ve stále větším měřítku používán nejen pro výrobu spotřebního zboží, ale také jako materiál pro realizaci technických dílů. Pro uskutečnění experimentů byl vybrán TIPPLEN K 199. Jde o kopolymer vhodný pro vstřikování, vyráběný firmou Tiszai Vegyi Kombinát Ltd.



*Obr. 4-3 Granule materiálu Tipplen K199*





Tab. 4.1 Přehled parametrů pro svařování ultrazvukem

materiál vzorků (obchodní název)	skelné vlákno %	počet exp.	Technologické podmínky svařování						
			h [mm]	psv [kPa]	pch [kPa]	tsv [s]	tch [s]	A [μm]	α [°]
Celstran+PPGF45	45	3	0,5	20	60	0,6	1	80	45
		3		23	70	0,8	1,5	85	60
		3		25	80	1	2	90	75
Celstran+PPGF30	30	3	0,5	20	60	0,6	1	80	45
		3		23	70	0,8	1,5	85	60
		3		25	80	1	2	90	75
Tipplen K199	0	3	0,5	20	60	0,6	1	80	45
		3		23	70	0,8	1,5	85	60
		3		25	80	1	2	90	75
Celstran+PPGF20	20	*	*	*	*	*	*	*	*
Frekvence 20 kHz									

amplituda **A**

výška usměrňovače **h**

čas svařování **tsv**

svařovací tlak **psv**

úhel usměrňovače **α**

čas chlazení svaru **tch**

tlak při chlazení svaru **pch**

\* Celstran +PP-GF20 měl být také použit k experimentům v této disertační práci. U zkoušky tahem bylo zjištěno, že struktura zkušebních vzorků je velice nehomogenní – při vstřikování na vstřikovacím lisu Engel AG typ ES ES 25/50 nebylo možné zajistit odpovídající plastifikaci granulí a docházelo ke vzniku míst s velkými shluky skelných vláken (viz příloha č.6) a míst bez skelných vláken. Výsledky zkoušek byly velice rozdílné a tudíž nevyhodnotitelné.

**Tab. 4.2 Materiálová data zkoušených materiálů**

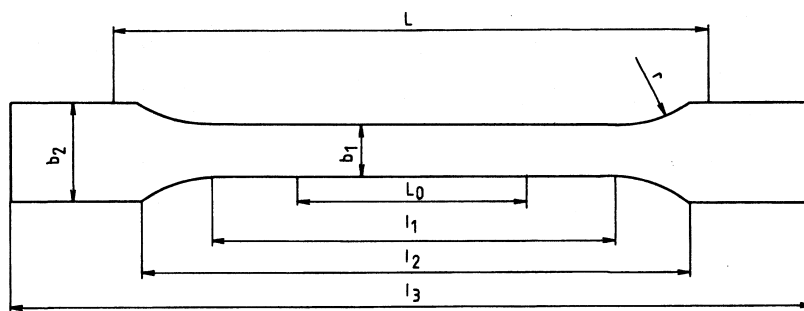
Vlastnost	Jednotka	Celstran +PP-GF45	Celstran +PP-GF30	Tipplen K1999	Norma/Metoda
Hustota	kg/m <sup>3</sup>	1280	1120	910	ISO 1183
Mez pevnosti v tahu při 23°C	MPa	111	95	27	ISO 527-2
Modul pružnosti v tahu při 23°C	MPa	9300	7200	1350	ISO 527-2
Vrubová houževnatost při 23°C (Charpy)	kJ/m <sup>2</sup>	20	18	1,9	ISO 179/1eA
MFR (230°C, 2,16 kg)	g/10min	1,13 *	2,54 *	30	ISO 1133

\* u materiálů Celstran+PP-GF45, Celstran+PP-GF30 se standardně neprovádí zkouška MFR, jelikož u těchto materiálů skelná vlákna mění tok taveniny, proto byla zkouška provedena v laboratoři KSP a její výsledek je pouze orientační.

## 4.2 Výroba vzorků

Z výše uvedených materiálů byly vyrobeny zkušební vzorky pro zkoušku tahem (obr. 4-4) a vzorky pro experimenty svařování ultrazvukem (obr. 4-7).

*Zkušební tyče pro tahovou zkoušku* (měřená délka je 50 ±0,5mm), které se používají pro základní materiál, byly vyrobeny na vstřikovacím lisu Engel AG typ ES ES 25/50 (obr. 4-9) a poté natrhány na trhacím stroji TIRA test 2300. Příklady tahových zkoušek zkoušených materiálů jsou uvedeny v příloze 1. Na obr. 4-5 a obr. 4-6 jsou uvedeny vzorky zkušebních tyčí po zkoušce tahem.



Obr. 4-4 Standardní zkušební tyč pro základní materiál



Obr. 4-5 Vzorek TIPPLENU K199 po tahové zkoušce (viz příloha č.1)



Obr. 4-6 Vzorek CELSTRANU+PP-GF45 po tahové zkoušce (viz příloha č.1)

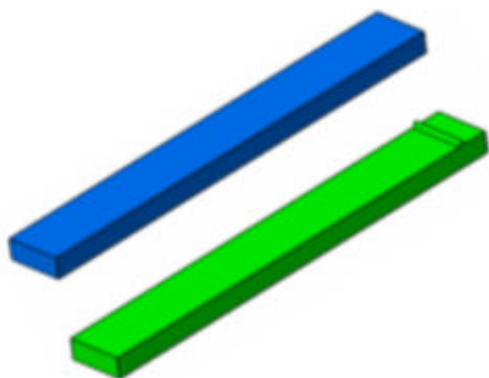
Zkušební vzorky pro experimenty svařování ultrazvukem byly vyrobeny ve tvaru tyčinek na vstřikovacím stroji Engel AG typ ES 25/50 (obr. 4-9) o rozměrech 4 x 10 - 80 mm

(obr. 4-7) ve vstřikovací formě, která byla navržena v rámci přípravy zkušebních vzorků. Vstřikovací forma byla vyrobena z oceli ČSN 19552 s vyměnitelnými vložkami, které měly různou geometrii usměřovače energie (obr. 4-10). Poté se tyto vzorky svařovaly v přeplátované poloze (obr. 4-8). Jeden ze dvou vzorků byl opatřen usměřovačem energie s různou výškou  $h$  a úhlem  $\alpha$ . (tab. 4.3).

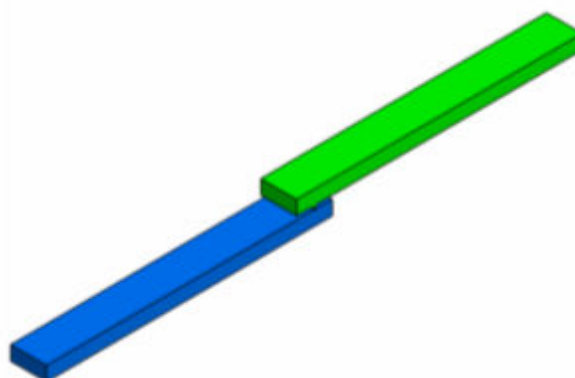
**Tab. 4.3 Rozměry usměřovače energie**

$h$ [mm]	$\alpha$ [°]
0,5	45
1	60
-	75

Tento tvar vzorků byl volen s ohledem na druh svaru, možnosti snadného upnutí do čelistí trhačího stroje, cenu vstřikovací formy a také s ohledem na tvar svařovacího nástroje – sonotrody.



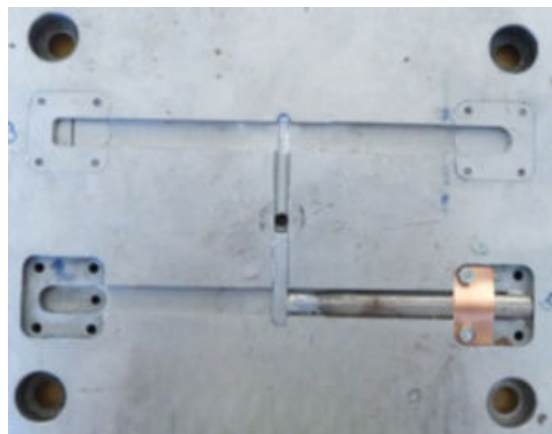
*Obr. 4-7 Zkušební tělesa bez a  
s usměřovačem*



*Obr. 4-8 Vzorky svařené v přeplátované  
poloze*



Obr. 4-9 Vstřikovací stroj Engel ES 25/50



Obr. 4-10 Forma pro výrobu zkušebních vzorků

V tabulce 4.4 jsou uvedeny technologické parametry nastavené při výrobě zkušebních vzorků. Celkem bylo vyrobeno přibližně 1600 kusů vzorků.

**Tab. 4.4 Nastavení technologických parametrů**

Parametry	Celstran+PP-GF45	Celstran+PP-GF30	Tipplen K199
Teplota taveniny	220 °C	200 °C	170 °C
Teplota formy	60 °C	60 °C	60 °C
Vstřikovací tlak	60 MPa	60 MPa	40 MPa
Doba vstřiku a dotlaku	25 s	25 s	25 s
Doba chlazení výstřiku ve formě	15 s	15 s	15 s
Doba cyklu	60 s	60 s	60 s

Z důvodů rozdílného indexu toku taveniny (MFR – viz tab. 4.2) zkoušených materiálů, byla nastavena u materiálů jiná teplota a tlak pro vstřikování. Při nastavení stejných parametrů tj. teploty taveniny – 220°C a vstřikovacího tlaku 60 MPa docházelo u Tipplenu k vytékání ze vstřikovací formy. Teplota formy byla měřena pyrometrem.

### 4.3 Svařování vzorků ultrazvukem

Svařování ultrazvukem bylo realizované na ultrazvukové svářečce firmy Dukane Corporation řady DPC model 220. Pro experimenty byla použita hliníková sonotroda. Frekvence ultrazvuku byla 20 kHz. Další parametry ultrazvukového svařování jsou uvedeny v kap. 4.5.1.

Pro svařování byl navrhnout svařovací přípravek (obr. 4-11), který zajišťoval vzájemnou polohu vzorků při svařování. Spodní vzorek - bez usměrňovače energie - nesmí být upnut pevnou vazbou na přípravek, protože by došlo k přenesení veškeré energie do přípravku, základní desky svařovacího zařízení a tak by neproběhlo svaření vzorků. Horní vzorek - s usměrňovačem energie - musí být v přípravku také „na volno“ a musí mu být umožněn vertikální pohyb se zachováním rovnoběžnosti stykových ploch. Přípravek byl vyroben ze slitiny hliníku.



*Obr. 4-11 Ultrazvuková svářečka a detail sonotrody se svařovacím přípravkem (vlevo)*

Svařené vzorky byly v místě svaru rozříznuty na mikrotomové řezačce LEICA RM2255 a následně byla provedena analýza řezu na mikroskopu LEICA DFC290 (obr. 4-12). Při přípravě vzorků pro analýzu řezu docházelo při řezání na mikrotomové řezačce k potížím s vytrhávání skelných vláken, tudíž vzorky byly řezány o větší tloušťce, ale bohužel tímto docházelo ke zvlnění řezů a nebylo možné zaostřit vzorek v celé ploše řezu.



*Obr. 4-12 Mikrotomová řezačka LEICA RM2255 a mikroskop LEICA DFC290*



*Obr. 4-13 Ukázka svařených vzorků - vlevo správně zvolené svařovací parametry  
- vpravo chybné nastavení – došlo k rozvaření zkušebních vzorků*

#### 4.4 Sledování pevnosti svarových spojů

Pro zjištění pevnosti spoje vytvořeného ultrazvukovým svařováním byla provedena zkouška tahem na trhacím stroji TIRA test 2300, kdy byl svařený vzorek namáhán tahovou silou  $F_{\max}$  do porušení. Deformace vzorků při upnutí do čelistí trhacího stroje byla eliminována vypodložením v místě upnutí (obr. 4-14). Vzorek byl namáhán tahovou silou, smykovou silou a ohybovým momentem. Rychlost zkoušení na trhacím stroji byla 20 mm/min.



Zkouška tahem byla provedena na základě evropské normy ČSN EN 12814 (část 2), která popisuje tzv. krátkodobou zkoušku. Tuto zkoušku je možno použít na tupých a přeplátovaných svarových spojích desek a trubek provedených na plněných a neplněných termoplastech.

Pro konkrétní materiály je předepsaná zkušební rychlost zkoušky, která musí být podle ISO 527-1 (pro PP rychlost 20 mm/min).



*Obr. 4-14 Upínací čelisti s vloženým svařeným vzorkem*

V tabulce 4.5 jsou naměřené maximální síly dosažené při porušení svarových spojů pro všechny zkoušené materiály a vypočtené průměrné hodnoty pevností svarových spojů. Tyto svarové spoje byly vytvořeny metodou svařování podle času.

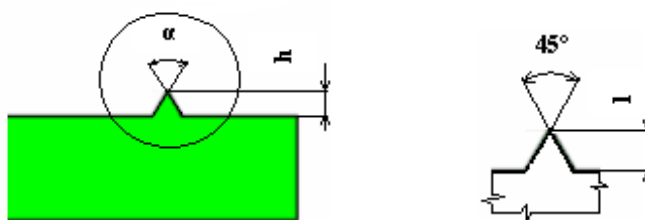


**Tab. 4.5 Průměrné hodnoty pevností  $R_m$  a průměrné maximální tahové síly zkoušených materiálů při metodě svařování podle času  $t_{sv}$** 

exp.	Celstran +PP-GF45		Celstran +PP-GF30		Tipplen K199	
	$\bar{\sigma} R_m$ [MPa]	$\bar{\sigma} F_{max}$ [N]	$\bar{\sigma} R_m$ [MPa]	$\bar{\sigma} F_{max}$ [N]	$\bar{\sigma} R_m$ [MPa]	$\bar{\sigma} F_{max}$ [N]
1	8,37	335	38,74	1482	25,31	1012
2	21,49	860	44,35	1744	26,12	1045
3	31,22	1249	44,35	1744	26,08	1043
4	22,35	894	38,39	1535	24,29	971
5	27,85	1114	45,59	1824	25,85	1034
6	32,05	1282	44,61	1785	<b>26,15</b>	1046
7	30,95	1238	45,31	1812	25,62	1025
8	14,31	572	45,51	1820	24,72	988
9	20,06	803	38,05	1522	25,67	1027
10	27,86	1114	44,12	1765	26,05	1042
11	22,31	892	39,12	1565	23,34	934
12	37,01	1480	38,22	1529	22,58	904
13	26,04	1042	44,85	1794	23,15	926
14	42,53	1701	<b>46,69</b>	1867	24,51	981
15	24,07	963	44,45	1778	23,98	959
16	<b>44,29</b>	1772	39,75	1591	23,83	954
17	35,58	1423	41,45	1658	21,85	874
18	41,87	1675	44,51	1780	23,81	952

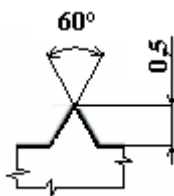
Hodnota  $R_m$  je maximální pevnost dosažená u zkušební vzorku po přetržení při krátkodobé zkoušce tahem. Hodnota  $\bar{\sigma} R_m$  (v tab. 4.5) je průměrná hodnota, která byla vypočtena ze získaných  $F_{max}$  u osmi vzorků zkoušených při každém experimentu. Hodnota  $\bar{\sigma} F_{max}$  je průměrná maximální síla potřebná na porušení svarového spoje.

Z tabulky 4.5 je zřejmé, že nejvyšší pevnosti v tahu bylo dosaženo u materiálu Celstran +PP-GF30 při těchto svařovacích parametrech: výška usměrňovače  $h = 1\text{mm}$ , úhel usměrňovače energie  $\alpha = 45^\circ$ , čas svařování  $t_{sv} = 1\text{s}$ , svařovací tlak  $p_{sv} = 23\text{ kPa}$ , tlak při chlazení svaru  $p_{ch} = 70\text{ kPa}$ , čas chlazení svaru  $t_{ch} = 1\text{s}$ , amplituda  $A = 85\text{ }\mu\text{m}$  a frekvenci 20 kHz činí  $\bar{\sigma} R_m = 46,69\text{ MPa}$ .



Obr. 4-15 Schéma usměrňovače energie

Nejnižší pevnost svarového spoje byla dosažena u Tiplenu K199 při těchto svařovacích parametrech: výška usměrňovače  $h = 0,5 \text{ mm}$ , úhel usměrňovače energie  $\alpha = 60^\circ$ , čas svařování  $t_{sv} = 1 \text{ s}$ , svařovací tlak  $p_{sv} = 23 \text{ kPa}$ , tlak při chladnutí svaru  $p_{ch} = 80 \text{ kPa}$ , čas chladnutí svaru  $t_{ch} = 1 \text{ s}$ , amplituda  $A = 80 \text{ }\mu\text{m}$  a frekvenci 20 kHz je  $\sigma R_m = 26,15 \text{ MPa}$ .



Obr. 4-16 Schéma detailu usměrňovače energie

U materiálu Celstran +PP-GF45 byla dosažena nejvyšší pevnost svarového spoje  $\sigma R_m = 44,29 \text{ MPa}$  při těchto svařovacích parametrech: výška usměrňovače  $h = 1 \text{ mm}$ , úhel usměrňovače energie  $\alpha = 45^\circ$ , čas svařování  $t_{sv} = 1 \text{ s}$ , svařovací tlak  $p_{sv} = 25 \text{ kPa}$ , tlak při chladnutí svaru  $p_{ch} = 60 \text{ kPa}$ , čas chladnutí svaru  $t_{ch} = 1,5 \text{ s}$ , amplituda  $A = 90 \text{ }\mu\text{m}$  a frekvenci 20 kHz.

V příloze 2 jsou pro ilustraci uvedeny výsledky tahových zkoušek svařených vzorků zkoušených materiálů.

## 4.5 Statistické řešení pevnosti

Pro experimentální stanovení svařovacích parametrů byla vybrána statistická metoda - metoda plánovaného experimentu (DOE), která umožňuje současně studovat vliv více nezávislých proměnných (faktorů) na sledovanou závisle proměnnou (odezvu). Plánovaný

experiment je ve své podstatě posloupností předem naplánovaných pokusů, ve kterých se cílevědomě provádí změna vstupních faktorů procesu tak, aby mohly být pozorovány a vhodným vyhodnocením experimentálních dat identifikovány odpovídající změny sledované odezvy.

*Odezva* je veličina, pomocí které vyjadřujeme výsledky experimentu. Odezva představuje závislou proměnnou. Při experimentech je nutno rozlišovat tři typy charakteristik (N,S,B): N - nominal is best, S - smaller is better, B - bigger is better.

*Faktor* neboli parametr je nezávislá návrhová proměnná, která ovlivňuje charakteristiku jakosti. Faktory označujeme velkými tiskacími písmeny, tj. A,B,C, atd. a jejich úrovně pro experiment označujeme jako A1 (faktor A na první úrovni), A2 (faktor A na druhé úrovni), atd.

Analýza výsledků experimentů spočívá především v nalezení kombinace faktorů, která dává nejlepší výsledek a dále v určení relativního podílu jednotlivých faktorů na jakosti výstupu.

V disertační práci jsem použila aplikaci Taguchiho plánovaného experimentu pro optimalizaci svařovacích parametrů. Byl optimalizován technologický proces ultrazvukového svařování vzorků z Celstranu +PP- GF45, Celstranu +PP-GF30 a Tipplenu K199 za účelem dosažení maximální pevnosti svaru představovaný maximální silou v tahu dosaženou při porušení svarového spoje. Tato síla představuje kritický znak jakosti svaru.

#### 4.5.1 Řešení optimalizace

Pro tuto disertační práci platí odezva „B“ – bigger is better (čím větší pevnost svarového spoje, tím lepší). Sledovanou odezvu (maximální sílu  $F_{\max}$ ) ovlivňuje sedm experimentálních faktorů:

**Tab. 4.6 Experimentální faktory**

Faktor	
A	výška usměrňovače <b>h</b>
B	svařovací tlak <b>p<sub>sv</sub></b>
C	tlak při chladnutí svaru <b>p<sub>ch</sub></b>
D	čas svařování <b>t<sub>sv</sub></b>
E	čas chladnutí svaru <b>t<sub>ch</sub></b>
F	amplituda <b>A</b>
G	úhel usměrňovače <b>α</b>

Za účelem prověření vlivu těchto faktorů bylo zvoleno nastavení těchto faktorů na třech úrovních, a u jednoho faktoru – výšky usměrňovače  $h$  – na dvou úrovních. Počet faktorů a počet úrovní ovlivňuje zvolení vhodné ortogonální matice. Byla zvolena matice  $L_{18}(2^1 \times 3^7)$ . Na základě vyplněné ortogonální matice (tab. 4.7) byl proveden návrh experimentu tj. byly stanoveny kombinace nastavení úrovní experimentálních faktorů představující minimální počet nutných pokusů potřebných pro vytvoření závěrů o sledovaném systému (tab. 4.8). Bylo provedeno osmnáct pokusů, z nichž každý byl osmkrát opakován. Výsledky představované dosaženými průměrnými hodnotami maximálních sil pro jednotlivá opakování těchto pokusů shrnuje tab. 4.8.

**Tab.4.7 Návrh experimentu podle ortogonální matice  $L_{18}(2^1 \times 3^7)$**

Exp.	faktor A - $h$	faktor B - $p_{sv}$	faktor C - $p_{ch}$	faktor D - $t_{sv}$	faktor E - $t_{ch}$	faktor F - $A$	faktor G - úhel $\alpha$
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	2	2	2	2	2
3	1	1	3	3	3	3	3
4	1	2	1	1	2	2	3
5	1	2	2	2	3	3	1
6	1	2	3	3	1	1	2
7	1	3	1	2	1	3	2
8	1	3	2	3	2	1	3
9	1	3	3	1	3	2	1
10	2	1	1	3	3	2	2
11	2	1	2	1	1	3	3
12	2	1	3	2	2	1	1
13	2	2	1	2	3	1	3
14	2	2	2	3	1	2	1
15	2	2	3	1	2	3	2
16	2	3	1	3	2	3	1
17	2	3	2	1	3	1	2
18	2	3	3	2	1	2	3

**Tab. 4.8 Zvolené svařovací parametry s výslednou  $\phi F_{max}$  pro Celstran+PP-GF45**

Exp.	faktor A - h[mm]	faktor B - p <sub>sv</sub> [kPa]	faktor C - p <sub>ch</sub> [kPa]	faktor D - t <sub>sv</sub> [s]	faktor E - t <sub>ch</sub> [s]	faktor F- A [μm]	faktor G- úhel α[ °]	Celstran GF45 ϕ F <sub>max</sub> [N]	směrodat odchylka σ [1]
1	0,5	20	60	0,6	1	80	45	335	124
2	0,5	20	70	0,8	1,5	85	60	860	132
3	0,5	20	80	1	2	90	75	1249	52
4	0,5	23	60	0,6	1,5	85	75	894	126
5	0,5	23	70	0,8	2	90	45	1114	107
6	0,5	23	80	1	1	80	60	1282	75
7	0,5	25	60	0,8	1	90	60	1238	48
8	0,5	25	70	1	1,5	80	75	572	98
9	0,5	25	80	0,6	2	85	45	803	85
10	1	20	60	1	2	85	60	1114	97
11	1	20	70	0,6	1	90	75	892	83
12	1	20	80	0,8	1,5	80	45	1480	85
13	1	23	60	0,8	2	80	75	1042	90
14	1	23	70	1	1	85	45	1701	63
15	1	23	80	0,6	1,5	90	60	963	90
16	1	25	60	1	1,5	90	45	1772	82
17	1	25	70	0,6	2	80	60	1423	57
18	1	25	80	0,8	1	85	75	1675	92

U každého faktoru na každé úrovni byl vypočítán průměrný účinek síly potřebné na porušení svarového spoje (tab. 4.9).

**Tab. 4.9 Průměrné účinky faktorů pro Celstran +PP - GF45**

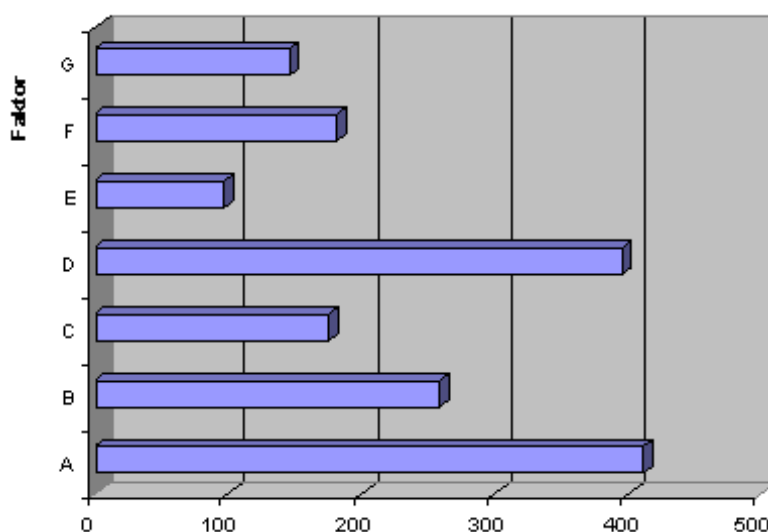
Faktor	ϕ F <sub>max</sub> [N]	Faktor	ϕ F <sub>max</sub> [N]
<b>A1</b>	927,44	<b>A2</b>	1 340,22
<b>B1</b>	988,33	<b>E1</b>	1 187,17
<b>B2</b>	1 166,00	<b>E2</b>	1 090,17
<b>B3</b>	1 247,17	<b>E3</b>	1 130,00
<b>C1</b>	1 065,83	<b>F1</b>	1 022,33
<b>C2</b>	1 093,67	<b>F2</b>	1 174,50
<b>C3</b>	1 242,00	<b>F3</b>	1 204,67
<b>D1</b>	885,00	<b>G1</b>	1 200,83
<b>D2</b>	1 234,83	<b>G2</b>	1 146,67
<b>D3</b>	1 281,67	<b>G3</b>	1 054,00

**Tab. 4.10 Třídění stupně důležitosti svařovacích faktorů pro Celstran +PP- GF45**

	faktor A - $h$	faktor B - $p_{sv}$	faktor C - $p_{ch}$	faktor D - $t_{sv}$	faktor E - $t_{ch}$	faktor F - A	faktor G - $\alpha$
úroveň 1	927,44	988,33	1 065,83	885,00	1 187,17	1 022,33	1 200,83
úroveň 2	1 340,22	1 166,00	1 093,67	1 234,83	1 090,17	1 174,50	1 146,67
úroveň 3	-	1 247,17	1 242,00	1 281,67	1 130,00	1 204,67	1 054,00
maximum	1 340,22	1 247,17	1 242,00	1 281,67	1 187,17	1 204,67	1 200,83
minimum	927,44	988,33	1 065,83	885,00	1 090,17	1 022,33	1 054,00
rozdíl	412,78	258,80	176,17	396,67	97,00	182,34	146,83
pozice	1	3	5	2	7	4	6
optimální podmínky	A2	B3	C3	D3	E1	F3	G1

Rozdíl mezi průměrnými hodnotami každého faktoru na úrovni s maximální a minimální hodnotou představuje relativní vliv účinku faktoru. Čím větší je tento rozdíl, tím větší je jeho vliv.

Největší vliv na maximální pevnost svaru má výška usměrňovače energie  $h$  (faktor A), čas svařování  $t_{sv}$  (faktor D) a svařovací tlak  $p_{sv}$  (faktor B) viz tab. 4.10 a obr. 4-17.



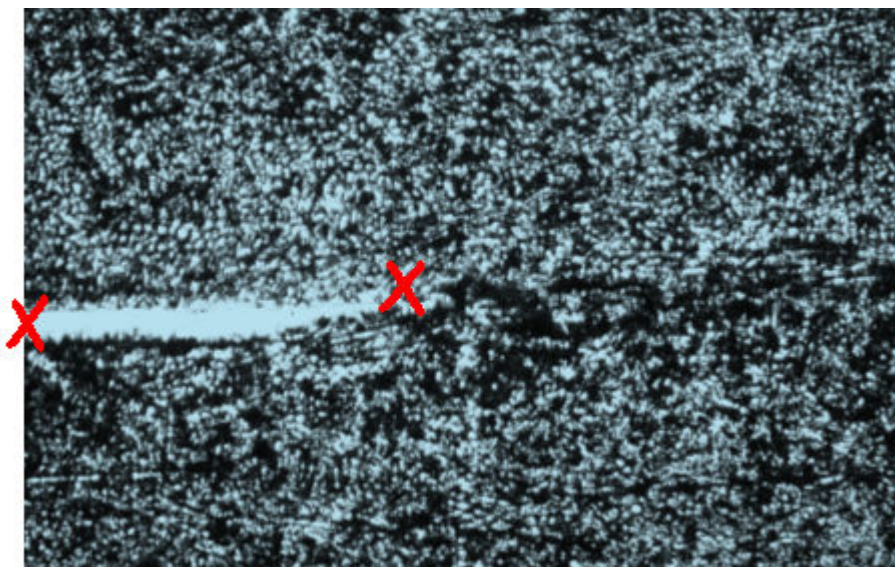
**Obr. 4-17 Graf 1 – vliv faktorů - “B – bigger is better”**

Cílem experimentů bylo provést takový návrh parametrů svařování ultrazvukem, aby pevnost svarového spoje byla co nejvyšší. Charakteristika jakosti je maximální pevnost svarového spoje, což je typ B (čím vyšší, tím lepší). Kombinace faktorů s nejlepším výsledkem (pravděpodobné optimum) bude A2, B3, C3, D3, E1, F3, G1.

U faktorů E a G – znamená zvětšování hodnoty negativní účinek na svařování (vyšly optima E1 a G1). Při úhlu  $\alpha$  usměřovače větším než  $45^\circ$  (při výšce  $h = 1\text{mm}$ ), dosahovala pevnost svarového spoje podstatně nižších hodnot (viz tab. 4.8).



Obr. 4-18 Vzorčky Celstranu po svaření a po zkoušce na trhacím stroji – nahoře - dobře provařená plocha, dole - nedostatečné provaření (použití usměřovače energie s  $h = 0,5\text{mm}$ )



Obr. 4-19 Řez v místě svarového spoje – při použití usměrňovače energie s výškou  $h=0,5\text{mm}$  a s časem svařování  $t_{sv} = 0,6\text{s}$  byl svar nedovařen – místo je označeno červenými křížky; 36x zvětšeno na optickém mikroskopu.

Podle výsledků zjištěných z experimentů byly nastaveny nové svařovací parametry – z faktorů A2, B3, C3, D3, E1, F3, G1. Vzorky byly poté svařeny, byla provedena tahová zkouška a experimenty byly vyhodnoceny následovně (příloha 3):

- průměrná maximální síla potřebná na porušení svarového spoje je  $\bar{F}_{\max} = 1736\text{ N}$ .

Grafické vyhodnocení vlivu proměnných faktorů na ultrazvukové svařování pro Celstran +PP- GF45, Celstran +PP-GF30 a pro Tipplen K 199 je uvedeno v příloze 4.





**Tab. 4.11 Zvolené svařovací parametry s výslednou  $\phi F_{max}$  pro Celstran+PP- GF30**

Exp.	faktor A - h[mm]	faktor B - p <sub>sv</sub> [kPa]	faktor C - p <sub>ch</sub> [kPa]	faktor D - t <sub>sv</sub> [s]	faktor E - t <sub>ch</sub> [s]	faktor F - A [μm]	faktor G - úhel α[ °]	Celstran GF 30 ϕ F <sub>max</sub> [ N]	směrodat odchylka σ [1]
1	0,5	20	60	0,6	1	80	45	1482	100
2	0,5	20	70	0,8	1,5	85	60	1744	80
3	0,5	20	80	1	2	90	75	1744	50
4	0,5	23	60	0,6	1,5	85	75	1535	150
5	0,5	23	70	0,8	2	90	45	1824	90
6	0,5	23	80	1	1	80	60	1785	94
7	0,5	25	60	0,8	1	90	45	1812	112
8	0,5	25	70	1	1,5	80	75	1820	52
9	0,5	25	80	0,6	2	85	45	1522	183
10	1	20	60	1	2	85	60	1765	94
11	1	20	70	0,6	1	90	75	1565	84
12	1	20	80	0,8	1,5	80	45	1529	58
13	1	23	60	0,8	2	80	75	1794	96
14	1	23	70	1	1	85	45	1867	44
15	1	23	80	0,6	1,5	90	60	1778	68
16	1	25	60	1	1,5	90	45	1591	43
17	1	25	70	0,6	2	80	60	1658	156
18	1	25	80	0,8	1	85	75	1780	72

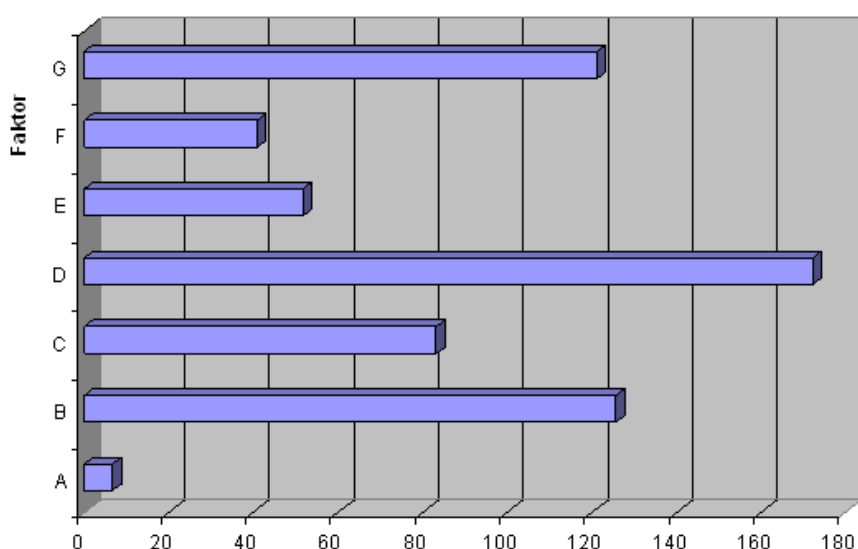
**Tab. 4.12 Průměrné účinky faktorů pro Celstran +PP- GF30**

Faktor	ϕ F <sub>max</sub> [N]	Faktor	ϕ F <sub>max</sub> [N]
A1	1696,44	A2	1703,00
B1	1638,20	E1	1715,17
B2	1763,80	E2	1666,17
B3	1697,17	E3	1717,83
C1	1663,17	F1	1678,00
C2	1746,33	F2	1702,17
C3	1689,67	F3	1719,00
D1	1590,00	G1	1635,83
D2	1747,17	G2	1757,00
D3	1762,00	G3	1706,17

**Tab. 4.13 Třídění stupně důležitosti svařovacích faktorů pro Celstran +PP-GF30**

	faktor A - $h$	faktor B - $p_{sv}$	faktor C - $p_{ch}$	faktor D - $t_{sv}$	faktor E - $t_{ch}$	faktor F - $A$	faktor G - $\alpha$
úroveň 1	1 696,44	1 638,20	1 663,17	1 590,00	1 715,17	1 678,00	1 635,83
úroveň 2	1 703,00	1 763,80	1 746,33	1 747,17	1 666,17	1 702,17	1 757,00
úroveň 3	-	1 697,17	1 689,67	1 762,00	1 717,83	1 719,00	1 706,17
maximum	1 703,00	1 763,80	1 746,33	1 762,00	1 717,83	1 719,00	1 757,00
minimum	1 696,44	1 638,20	1 663,17	1 590,00	1 666,17	1 678,00	1 635,83
rozdíl	6,56	125,60	83,16	172,00	51,66	41	121,17
pozice	7	2	4	1	5	6	3
optimální podmínky	A2	B2	C2	D2	E3	F3	G2

Největší vliv na maximální pevnost svaru má čas svařování  $t_{sv}$  (faktor D), svařovací tlak  $p_{sv}$  (faktor B) a úhel usměrňovače  $\alpha$  (faktor G) viz tab. 4.13 a obr. 4-20.



*Obr. 4-20 Graf 2 – vliv faktorů - “B – bigger is better”*



Z výsledků zjištěných z experimentů byly nastaveny nové svařovací parametry – podle faktorů A2, B2, C2, D2, E13, F3, G2. Vzorky byly poté svařeny, byla provedena tahová zkouška a experimenty byly vyhodnoceny následovně (příloha 3):

- průměrná maximální síla potřebná na destrukci svarového spoje je  $\sigma F_{\max} = 1893 \text{ N}$ .

**Tab. 4.14 Zvolené svařovací parametry s výslednou  $\sigma F_{\max}$  pro Tipplen K199**

Exp.	faktor A - h[mm]	faktor B - p <sub>sv</sub> [kPa]	faktor C - p <sub>ch</sub> [kPa]	faktor D - t <sub>sv</sub> [s]	faktor E - t <sub>ch</sub> [s]	faktor F - A [μm]	faktor G - úhel α[ °]	Tipplen K199 σ F <sub>max</sub> [ N ]	směrodat odchylka σ [1]
1	0,5	20	60	0,6	1	80	45	1012	30
2	0,5	20	70	0,8	1,5	85	60	1045	6
3	0,5	20	80	1	2	90	75	1043	19
4	0,5	23	60	0,6	1,5	85	75	971	43
5	0,5	23	70	0,8	2	90	45	1034	9
6	0,5	23	80	1	1	80	60	1046	24
7	0,5	25	60	0,8	1	90	45	1025	3
8	0,5	25	70	1	1,5	80	75	988	27
9	0,5	25	80	0,6	2	85	45	1027	10
10	1	20	60	1	2	85	60	1042	10
11	1	20	70	0,6	1	90	75	934	28
12	1	20	80	0,8	1,5	80	45	904	14
13	1	23	60	0,8	2	80	75	926	35
14	1	23	70	1	1	85	45	981	11
15	1	23	80	0,6	1,5	90	60	959	17
16	1	25	60	1	1,5	90	45	954	11
17	1	25	70	0,6	2	80	60	874	3
18	1	25	80	0,8	1	85	75	952	6

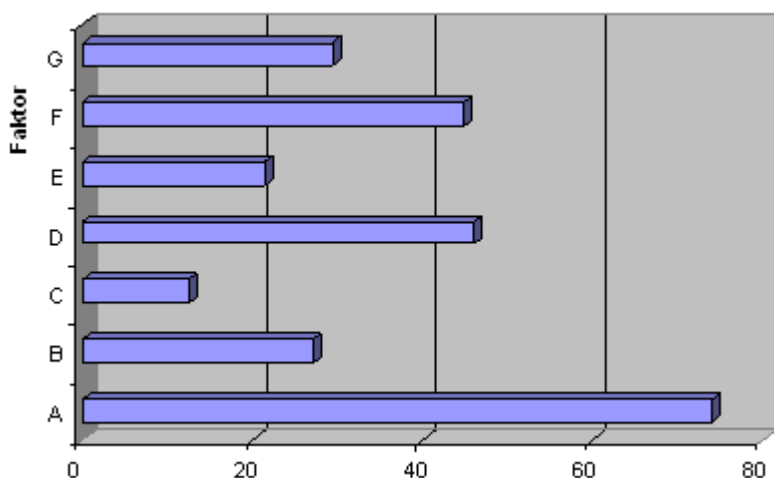
**Tab. 4.15 Průměrné účinky faktorů pro Tipplen K199**

Faktor	$\sigma F_{\max}$ [N]	Faktor	$\sigma F_{\max}$ [N]
A1	1021,22	A2	947,33
B1	996,67	E1	991,67
B2	986,17	E2	970,17
B3	970,00	E3	991,00
C1	988,33	F1	958,33
C2	976,00	F2	1003,00
C3	988,50	F3	991,50
D1	962,83	G1	985,33
D2	981,00	G2	998,50
D3	1009,00	G3	969,00

**Tab. 4.16 Třídění stupně důležitosti svařovacích faktorů pro Tipplen K199**

	faktor A - h	faktor B - $p_{sv}$	faktor C - $p_{ch}$	faktor D - $t_{sv}$	faktor E - $t_{ch}$	faktor F - A	faktor G - $\alpha$
úroveň 1	1 021,22	996,67	988,33	962,83	991,67	958,33	985,33
úroveň 2	947,33	986,17	976,00	981,00	970,17	1 003,00	998,50
úroveň 3	-	970,00	988,50	1 009,00	991,00	991,50	969,00
maximum	1 021,22	996,67	988,50	1 009,00	991,67	1 003,00	998,50
minimum	947,33	970,00	976,00	962,83	970,17	958,33	969,00
rozdíl	73,89	26,67	12,50	46,17	21,50	44,67	29,50
pozice	1	4	7	2	6	3	5
optimální podmínky	A1	B1	C3	D3	E1	F2	G2

Největší vliv na maximální pevnost svaru má výška usměrňovače energie h (faktor A), čas svařování  $t_{sv}$  (faktor D) a amplituda (faktor F) viz tab. 4.16 a obr. 4-21.



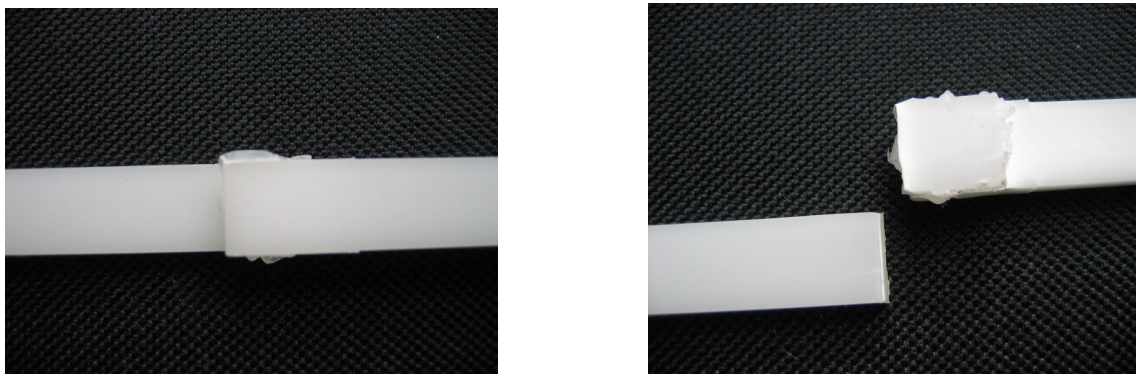
Obr. 4-21 Graf 3 – vliv faktorů - “B – bigger is better”

U faktorů A, B a E – znamená opět zvětšování hodnoty negativní účinek na svařování (*optima vyšla A1, B1 a E1*). Při výšce usměrňovače  $h = 1\text{ mm}$  byl velký výronek taveniny ze svarového spoje a svařené vzorky se často trhaly mimo svar (obr. 4-22).

Podle výsledků zjištěných z experimentů byly nastaveny nové svařovací parametry – z faktorů A1, B1, C3, D3, E1, F2, G2. Vzorky byly poté svařeny, byla provedena tahová zkouška a experimenty byly vyhodnoceny následovně (příloha 3):

- průměrná maximální síla potřebná na destrukci svarového spoje je  $\bar{F}_{\max} = 1026\text{ N}$ .

Z naměřených hodnot pevnosti ve smyku vyplývá, že při použití delšího svařovacího času  $t_{\text{sv}}$  (faktor D) je pevnost svaru vyšší než při použití kratšího svařovacího času  $t_{\text{sv}}$ . U vzorků svařených delším časem docházelo při trhací zkoušce k porušení mimo svar. Vzorky svařené kratším časem se porušily v místě svaru. Dá se předpokládat, že k porušení vzorků mimo svar svařených delším časem  $t_{\text{sv}}$ , dochází z důvodu ideálního provaření svařovaných dílů a tím dostaneme navýšení průřezu vzorku. K porušení vzorků tedy dojde v místě menšího průřezu.



Obr. 4-22 Svařený vzorek TIPPLENU a vzorek po zkoušce na trhačím stroji (vpravo)

Z naměřených průměrných maximálních sil  $F_{\max}$  potřebných k porušení svarového spoje vidíme, že se stoupajícím procentem skelných vláken v matrici klesá pevnost svarového spoje.

U Tipplenu dosahuje pevnost svarového spoje přibližně stejných hodnot jako pevnost v tahu základního materiálu (viz příloha 1 - tahová zkouška Tipplenu).

Z výše uvedených hodnot viz tab. 4.10, 4.13, 4.16 je zřejmé, že pro svařování ultrazvukem je nejdůležitějším parametrem geometrie usměřovače energie a svařovací čas  $t_{sv}$ .

Na základě těchto výsledků byly provedeny ještě další experimenty, ve kterých byly použity statisticky zjištěné nejlepší parametry svařovacího procesu viz kap. 4.5.1.

#### 4.5.2 Ověření výsledků zvolené statistické metody

Pro Celstran +PP-GF45 a pro Celstran +PP-GF30 byla provedena další měření, kdy byly podle výsledků zjištěných z experimentů Taguchiho metody (výše uvedených) nastaveny nové svařovací parametry - z faktorů - A2 ( $h = 1\text{ mm}$ ), B3 ( $p_{sv} = 25\text{ kPa}$ ), C3 ( $p_{ch} = 80\text{ kPa}$ ), D3 ( $t_{sv} = 1\text{ s}$ ), E1 ( $t_{ch} = 1\text{ s}$ ), F3 ( $A = 90\text{ }\mu\text{m}$ ), G1 (úhel  $\alpha = 45^\circ$ ) - u kterých, při použití Taguchiho metody, bylo dosaženo nejlepších výsledků pevnosti svarových spojů. Jako proměnnou byl zvolen čas svařování  $t_{sv}$  (faktor D) a ve druhém měření byl proměnnou svařovací tlak  $p_{sv}$  (faktor B). U materiálu Tipplen K 199 se tyto ověřovací experimenty neprováděli, jelikož docházelo k rozvaření zkušebních vzorků při nastavení výše uvedených svařovacích parametrů.

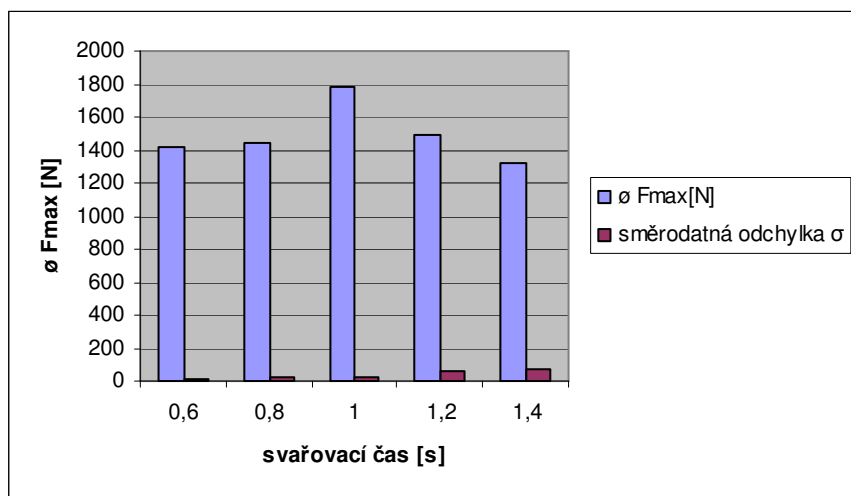
Každý experiment byl osmkrát opakován.

**Tab.4.17 Parametry  $t_{sv}$  pro Celstran +PP- GF45**

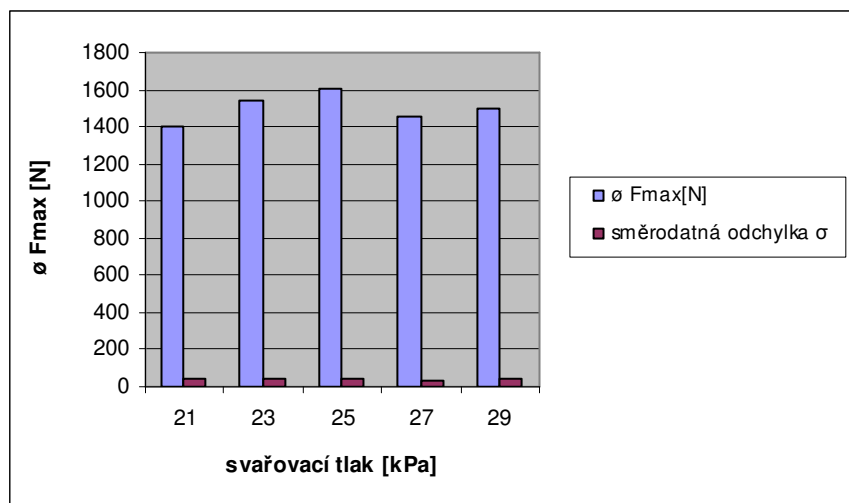
čas svařování $t_{sv}$ [s]	$\bar{\sigma} F_{max}$ [N]	směrodatná odchylka $\sigma$
0,6	1421,7	13,7
0,8	1437,6	26,5
<b>1</b>	1787,3	28,7
1,2	1494,8	58,6
1,4	1322,6	66,8

**Tab.4.18 Parametry  $p_{sv}$  pro Celstran +PP- GF45**

svařovací tlak $p_{sv}$ [kPa]	$\bar{\sigma} F_{max}$ [N]	směrodatná odchylka $\sigma$
21	1402,2	44
23	1536,1	42,7
25	1601,5	41,8
27	1453,4	31,5
29	1494,2	43,1



**Obr. 4-23 Graf 4 – Závislost  $\bar{\sigma} F_{max}$  na svařovacím čase pro Celstran+PP GF45**



Obr. 4-24 Graf 5 – Závislost  $\bar{\sigma} F_{max}$  na svařovacím tlaku pro **Celstran+PP GF45**

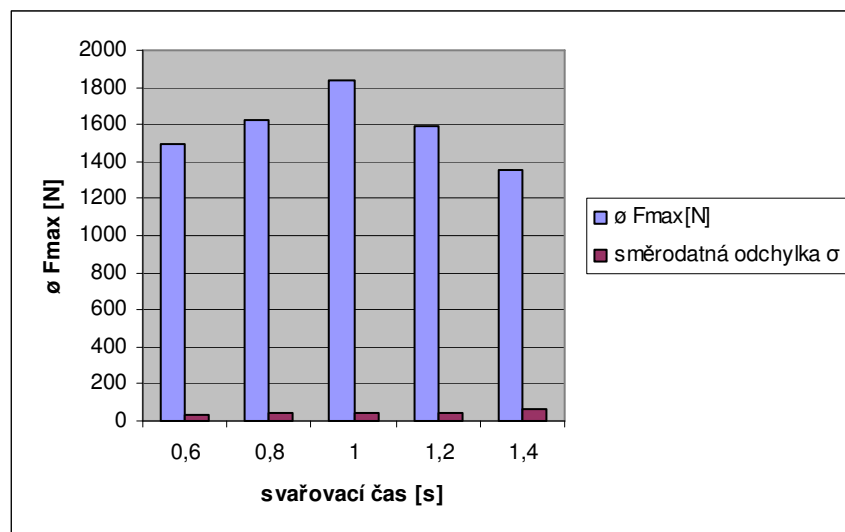
Tab. 4.19 Parametry  $t_{sv}$  pro **Celstran +PP- GF30**

čas svařování $t_{sv}[s]$	$\bar{\sigma} F_{max}[N]$	směrodatná odchylka $\sigma$
0,6	1491,5	31,1
0,8	1623,8	42,1
1	1842,3	38,2
1,2	1587,6	47,3
1,4	1354,8	64,1

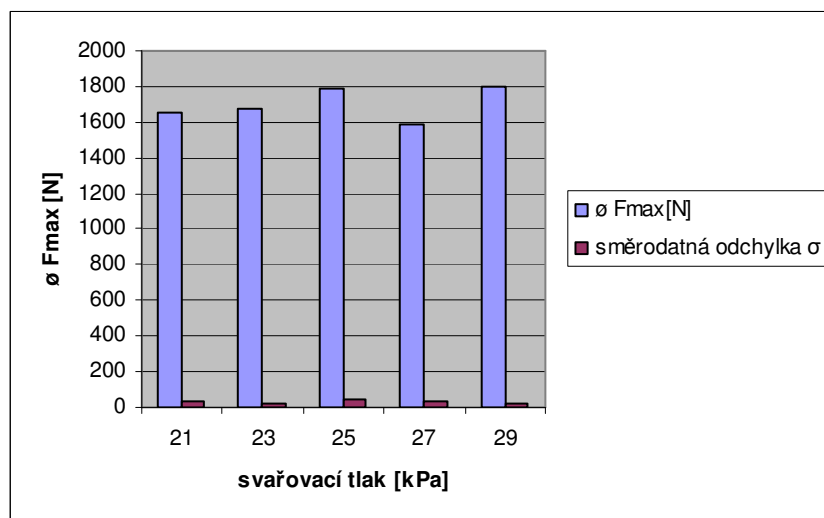
Tab. 4.20 Parametry  $p_{sv}$  pro **Celstran +PP- GF30**

svařovací tlak $p_{sv}[kPa]$	$\bar{\sigma} F_{max}[N]$	směrodatná odchylka $\sigma$
21	1652,4	35,1
23	1677,2	24,7
25	1785,5	39,8
27	1591,0	32,7
29	1796,3	24,3





Obr. 4-25 Graf 6 – Závislost  $\bar{\sigma}$  síly  $F_{max}$  na svařovacím čase pro **Celstran+PP-GF30**



Obr. 4-26 Graf 7 – Závislost  $\bar{\sigma}$  síly  $F_{max}$  na svařovacím tlaku pro **Celstran+PP-GF30**

Pro **Celstran +PP-GF45** z naměřených hodnot maximálních sil  $\bar{\sigma}$   $F_{max}$  potřebných na porušení svarových spojů vyplývá, že při použití delšího svařovacího času dosahovaly tyto síly vyšších hodnot, ovšem pouze do  $t_{sv} = 1s$ . Poté jejich naměřená hodnota rapidně klesá. Prodlužováním svařovacího času nad optimální hodnotu dojde k výronku taveniny po obvodu svarového spoje, pevnost se však nezvýší.

U svařovacího tlaku  $p_{sv}$  maximální síly  $\sigma F_{max}$  dosahovaly při měření velice proměnlivých hodnot, což je patrné z tab. 4.18. Největší hodnota průměrné síly  $\sigma F_{max}$  potřebné k porušení svarového spoje byla dosažena při nastavení svařovacího tlaku  $p_{sv} = 25$  kPa (viz graf 5 obr. 4.24), stejně jako při výše uvedeném experimentu Taguchiho metody.

U **Celstranu +PP-GF30** bylo použito stejného nastavení svařovacích parametrů jako pro Celstran +PP-GF45 ačkoliv, podle Taguchiho metody byly vyhodnoceny jiné svařující parametry jako nejdůležitější. Takto zvolené nastavení bylo provedeno z důvodu porovnání hlavního zkoušeného materiálu – Celstran +PP-GF45 s Celstranem +PP-GF30.

Nejvyšší hodnoty maximálních sil  $\sigma F_{max}$  na porušení svarových spojů byly naměřeny stejně jako u Celstranu +PP-GF45 při svařovacím čase  $t_{sv} = 1$  s. Se vzrůstajícím časem svařování hodnota naměřených  $\sigma F_{max}$  také klesala (tab.4.19). U svařovacího tlaku  $p_{sv}$  hodnota měřených  $\sigma F_{max}$  kolísala, ale nejvyšších hodnot  $\sigma F_{max}$  bylo dosaženo při nastavení svařovacího tlaku  $p_{sv} = 29$  kPa.

Experimentální část disertační práce byla rozdělena podle metod svařování do dvou skupin: 1) podle času  $t_{sv}$  (viz kap. 4.5.1)

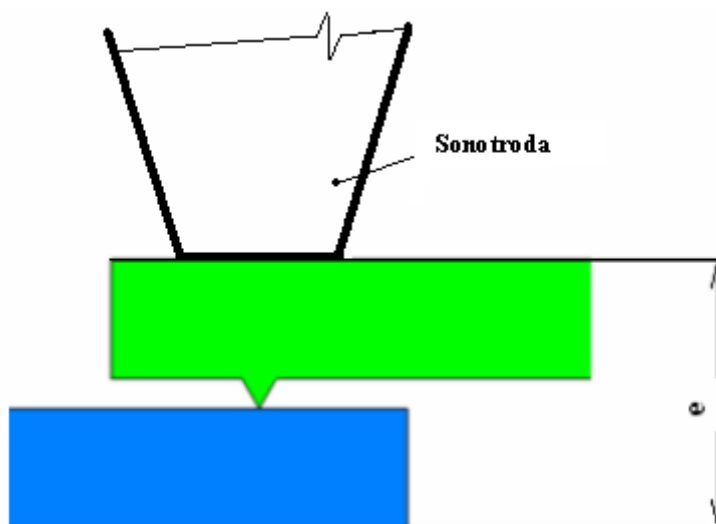
2) svařování podle absolutní vzdálenosti

V následující kapitole 4.5.3 je vyhodnoceno svařování podle absolutní vzdálenosti, tzn., že při svařování bude vždy docíleno vzájemné polohy svařovaných vzorků ve svislém směru. Vzorky pro tyto experimenty byly vyrobeny stejným způsobem jako vzorky na svařování podle času tj. na vstřikovacím lisu Engel AG typ ES 25/50 o rozměrech 4 x 10 x 80 mm. Poté se tyto vzorky svařovaly v přeplátované poloze a byly natrhány na trhacím stroji TIRA test 2300.

#### 4.5.3 Ultrazvukové svařování podle absolutní vzdálenosti

Třetí část experimentů byla provedena opět pomocí Taguchiho metody a bylo vybráno svařování podle absolutní vzdálenosti  $e$  ( $e$  – vzdálenost mezi kontaktní plochou přípravku se spodním dílem a pracovní plochou sonotrody v konečné poloze během vlastního svařování). Tato vzdálenost byla po zkušebních experimentech nastavena na hodnotu  $e = 8,15$  mm (při

nastavení vzdálenosti  $e < 8,15$  mm docházelo k výronku taveniny z místa svarového spoje. Ovšem při zkoušce tahem dosahovaly tyto svarové spoje větší pevnost).



*Obr. 4 - 27 Schéma definice absolutní vzdálenosti  $e$*

Svařoval se pouze hlavní zkoušený materiál Celstran +PP-GF45. Opět bylo provedeno osmnáct experimentů, z nichž každý byl osmkrát opakován. Výsledky představované dosaženými průměrnými hodnotami maximálních sil  $\sigma F_{\max}$  pro jednotlivá opakování těchto experimentů shrnuje tab. 4.21.

**Tab. 4.21 Zvolené svařovací parametry s výslednou  $\phi$  maximální tahovou silou  $F_{max}$**

Exp.	h [mm]	úhel [°]	A [ $\mu$ m]	P <sub>sv</sub> [kPa]	P <sub>ch</sub> [kPa]	t <sub>ch</sub> [s]	Celstran GF45 $\phi$ F <sub>max</sub> [N]	směrodatná odchylka $\sigma$
1	0,5	45	80	20	60	1	1217,7	32,1
2	0,5	45	85	23	70	1,5	1412,3	35,9
3	0,5	45	90	25	80	2	1318,8	36,1
4	0,5	60	80	20	70	1,5	1337,7	28,9
5	0,5	60	85	23	80	2	1298,3	30,6
6	0,5	60	90	25	60	1	1312,8	26,3
7	0,5	75	80	23	60	2	1270,8	34,5
8	0,5	75	85	25	70	1	1301,6	37,3
9	0,5	75	90	20	80	1,5	1240,8	19,9
10	1	45	80	25	80	1,5	1636,0	82,5
11	1	45	85	20	60	2	1712,0	27,8
12	1	45	90	23	70	1	1505,0	24,5
13	1	60	80	23	80	1	1367,0	58,2
14	1	60	85	25	60	1,5	1388,1	45,1
15	1	60	90	20	70	2	1496,0	21,3
16	1	75	80	25	70	2	1460,5	28,5
17	1	75	85	20	80	1	1412,0	25,4
18	1	75	90	23	60	1,5	1514,0	38,8

**Tab. 4.22 Průměrné účinky faktorů pro Celstran +PP- GF45**

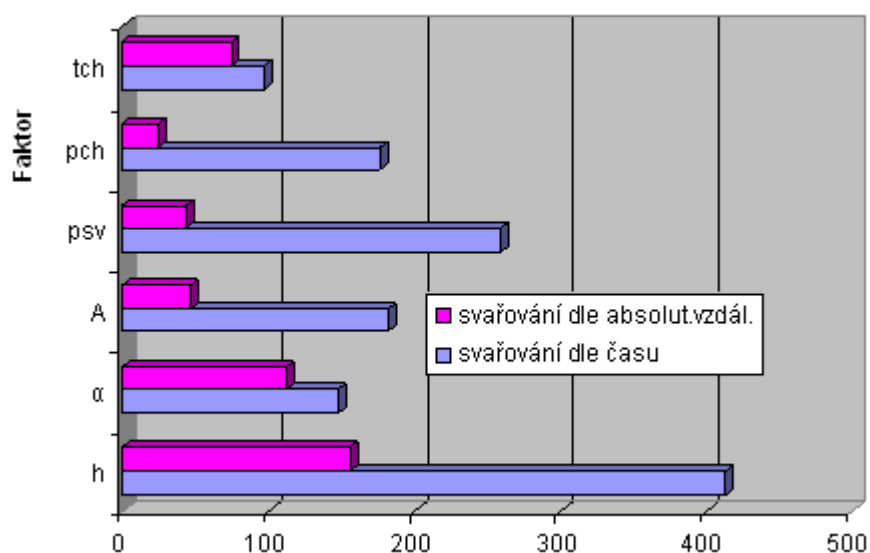
Faktor	$\phi$ F [N]	Faktor	$\phi$ F [N]
A1	1316,54	A2	1471,41
B1	1477,30	E1	1406,90
B2	1365,30	E2	1424,50
B3	1376,62	E3	1400,50
C1	1387,45	F1	1364,04
C2	1433,72	F2	1429,80
C3	1409,91	F3	1437,94
D1	1399,70	D3	1437,60
D2	1394,60		

Grafické vyhodnocení vlivu proměnných faktorů na ultrazvukové svařování pro Celstran +PP GF45 je uvedeno v příloze 5.

**Tab.4.23 Třídění stupně důležitosti svařovacích faktorů pro Celstran +PP- GF45**

	faktor A - h	faktor B - $\alpha$	faktor C - A	faktor D - $p_{sv}$	faktor E - $p_{ch}$	faktor F - $t_{ch}$
úroveň 1	1 316,54	1 477,30	1 387,45	1 399,70	1 406,90	1 364,04
úroveň 2	1 471,41	1 365,30	1 433,72	1 394,60	1 424,50	1 429,80
úroveň 3	-	1 376,60	1 409,91	1 437,60	1 400,50	1 437,94
maximum	1 471,41	1 477,30	1 433,72	1 437,60	1 424,50	1 437,94
minimum	1 316,54	1 365,30	1 387,45	1 394,60	1 400,50	1 364,04
rozdíl	154,87	112,00	46,27	43,00	24,00	73,84
pozice	1	2	4	5	6	3
optimální podmínky	A2	B1	C2	D3	E2	F3

Největší vliv na maximální pevnost svaru má výška usměrňovače energie h (faktor A), úhel usměrňovače  $\alpha$  a amplituda A (faktor F) viz tab. 4.23.

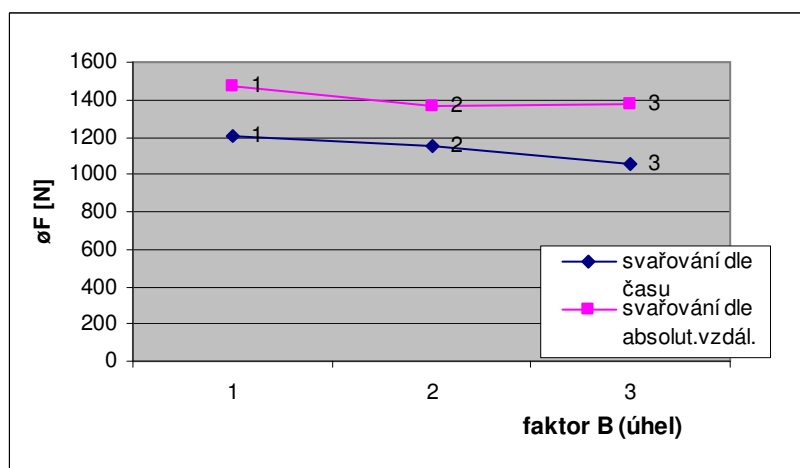
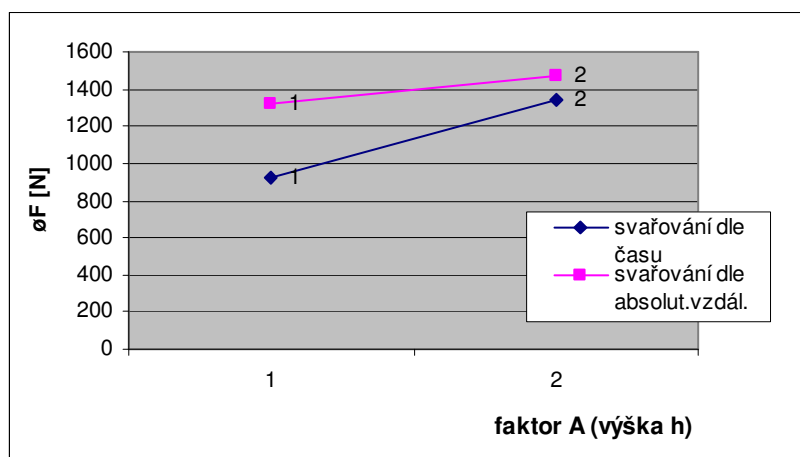


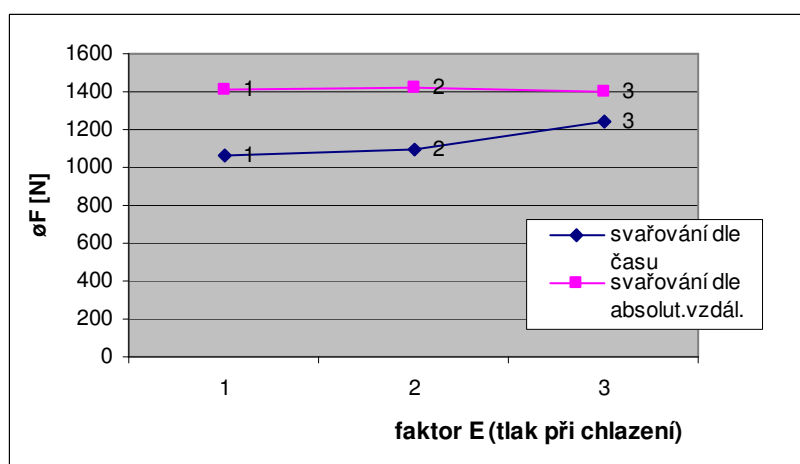
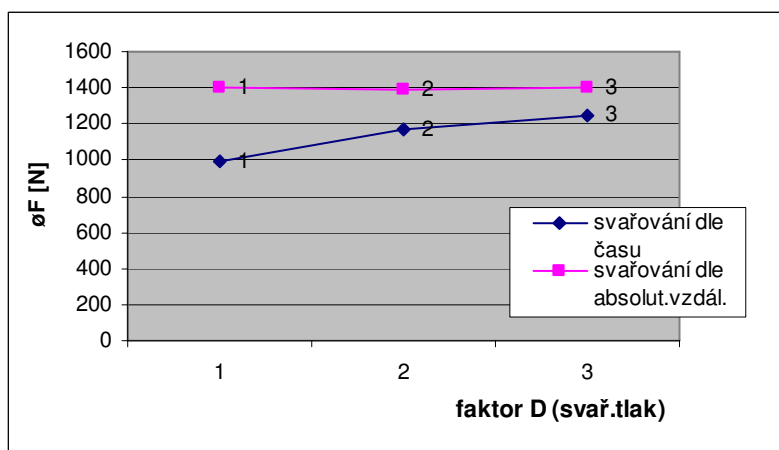
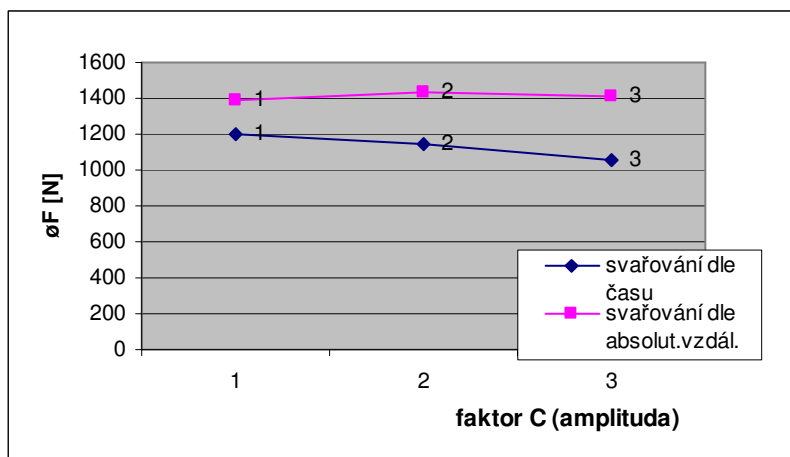
**Obr. 4-28 Graf 8 – vliv faktorů - “B – bigger is better”- porovnání způsobů svařování**

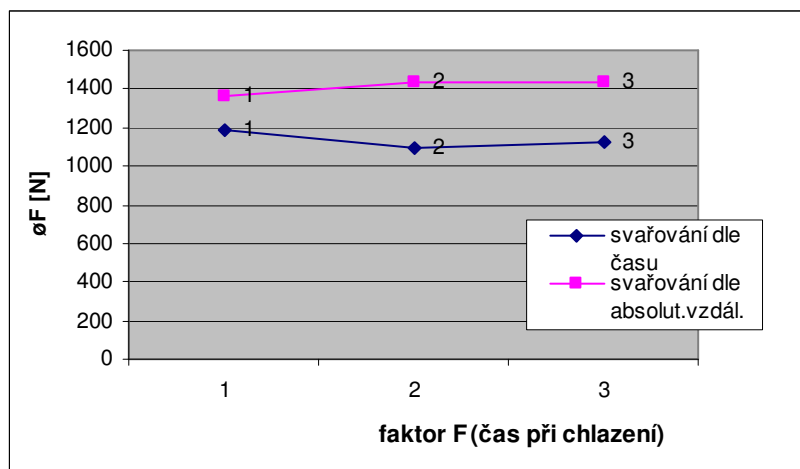
Z výsledků zjištěných z experimentů byly nastaveny nové svařovací parametry – podle faktorů A2, B1, C2, D3, E2, F3. Vzorky byly poté svařeny, byla provedena tahová zkouška a experimenty byly vyhodnoceny následovně:

- průměrná maximální síla potřebná na porušení svarového spoje je  $\sigma F_{\max} = 1513,4 \text{ N}$ .

*Hlavní vliv* na pevnost svarových spojů zkoušených materiálů plněných dlouhými skelnými vlákny má konstrukční řešení svarových ploch respektive výška usměrňovače energie  $h$ . Pro Celstran +PP GF45 i pro Celstran +PP GF30 vychází ve všech měření výška  $h = 1 \text{ mm}$ . Při použití  $h = 0,5 \text{ mm}$  byla pevnost svaru minimální a často ani nedošlo k vytvoření konzistentního svaru (viz tab. 4.8 a obr. 4-18 v kapitole 4.5.1), došlo pouze k rozvaření usměrňovače energie.







Obr. 4-29 Grafy 9 – Porovnání vlivů proměnných faktorů ultrazvukového svařování pro Celstran +PP - GF45

## 4.6 Stanovení orientace skelného vlákna ve svarovém spoji

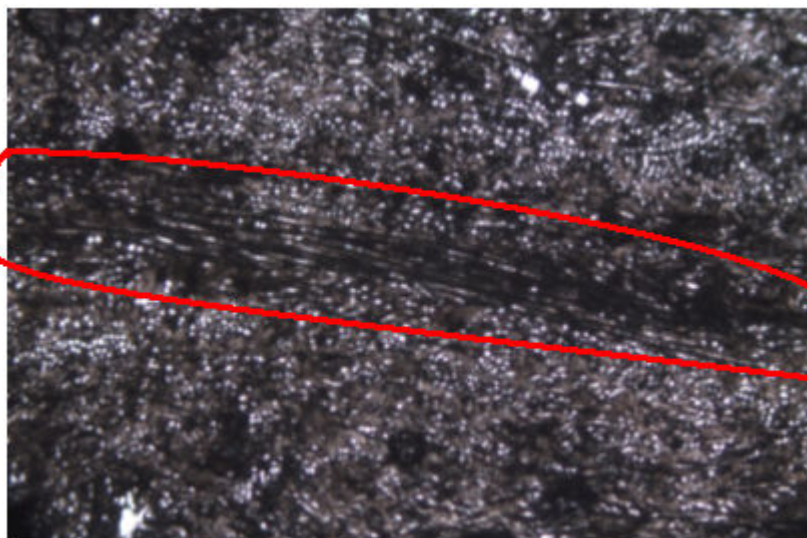
Při rozboru vnitřní struktury svarů pomocí optické mikroskopie (na mikroskopu LEICA DFC 290) bylo zjištěno, že při ultrazvukovém svařování vzorků dochází ke změně orientace skelných vláken v místě styku svařovaných ploch.

*Svarový spoj* termoplastů je z hlediska struktury značně nehomogenní což je způsobeno již výrobě vzorků (součástí) vstřikováním. Vířením taveniny ve formě se ve výstřiku vyskytují oblasti s různou orientací vláken. Při svařování je svarový spoj ovlivněn teplem vneseným do svarového spoje a dochází ke změně orientace vláken.

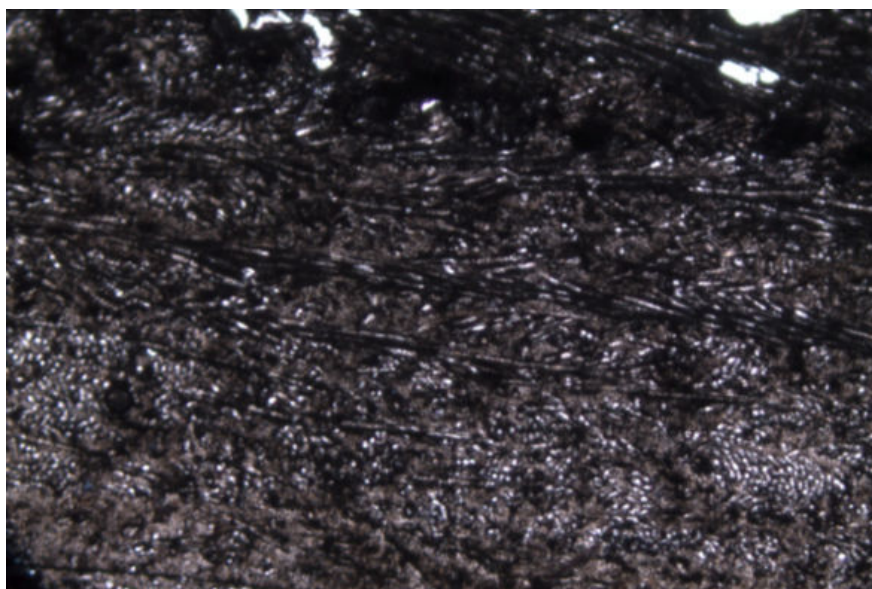
Na obr. 4-30 je struktura termoplastu Celstran +PP-GF45, která byla sledována s 36-ti násobným zvětšením. Světlá místa jsou pohled na čelní řez vlákeny a tmavé souvislé pole (na obr. 4-30 označeno červeně) je místo svaru.

Na obr. 4-31 je patrna struktura termoplastu Celstran +PP-GF45, která byla sledována s 36-ti násobným zvětšením.

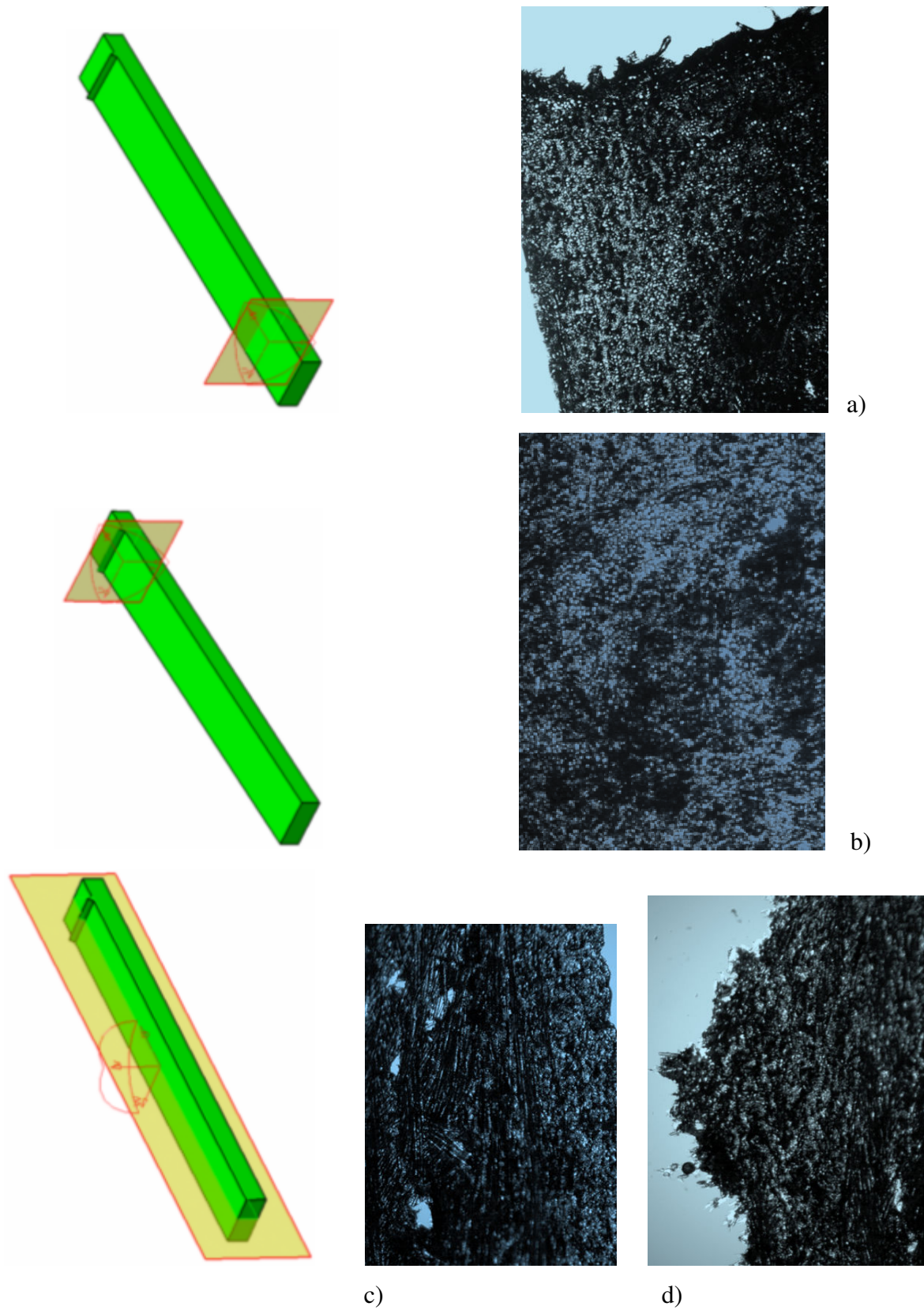




Obr. 4-30 Řez svarem, který byl svařen v sérii experimentů č.13 ( $h = 1\text{mm}$ ,  $t_{sv} = 0,8\text{s}$ ,  $t_{ch} = 2\text{s}$ ,  $p_{sv} = 23\text{kPa}$ ,  $p_{ch} = 60\text{kPa}$ ,  $A = 80\text{ }\mu\text{m}$ ,  $\alpha = 75^\circ$ ) a průměrná  $F_{max}$  dosahovala 1042 N, zvětšeno 36x na optickém mikroskopu.



Obr. 4-31 Řez svarem, který byl svařen v sérii experimentů č.18 ( $h = 1\text{mm}$ ,  $t_{sv} = 0,8\text{s}$ ,  $t_{ch} = 1\text{s}$ ,  $p_{sv} = 25\text{kPa}$ ,  $p_{ch} = 80\text{kPa}$ ,  $A = 85\text{ }\mu\text{m}$ ,  $\alpha = 75^\circ$ ) a kde průměrná  $F_{max}$  dosahovala 1675 N, zvětšeno 36x na optickém mikroskopu.



Obr. 4-32 Vzorky řezů s označeným místem odběru ze zkušebních nesvařených vzorků – (Celstran GF+PP-45) – zvětšeno 36x

Na obr. 4-32 jsou uvedeny čtyři vzorky struktur a) až d) a v levé části jsou uvedena tři schémata zkušebních vzorků s vyznačeným místem řezu, jemuž odpovídá příslušná struktura. Horní zkušební vzorek ukazuje místo sledované struktury, která je blízko vtoku viz struktura a).

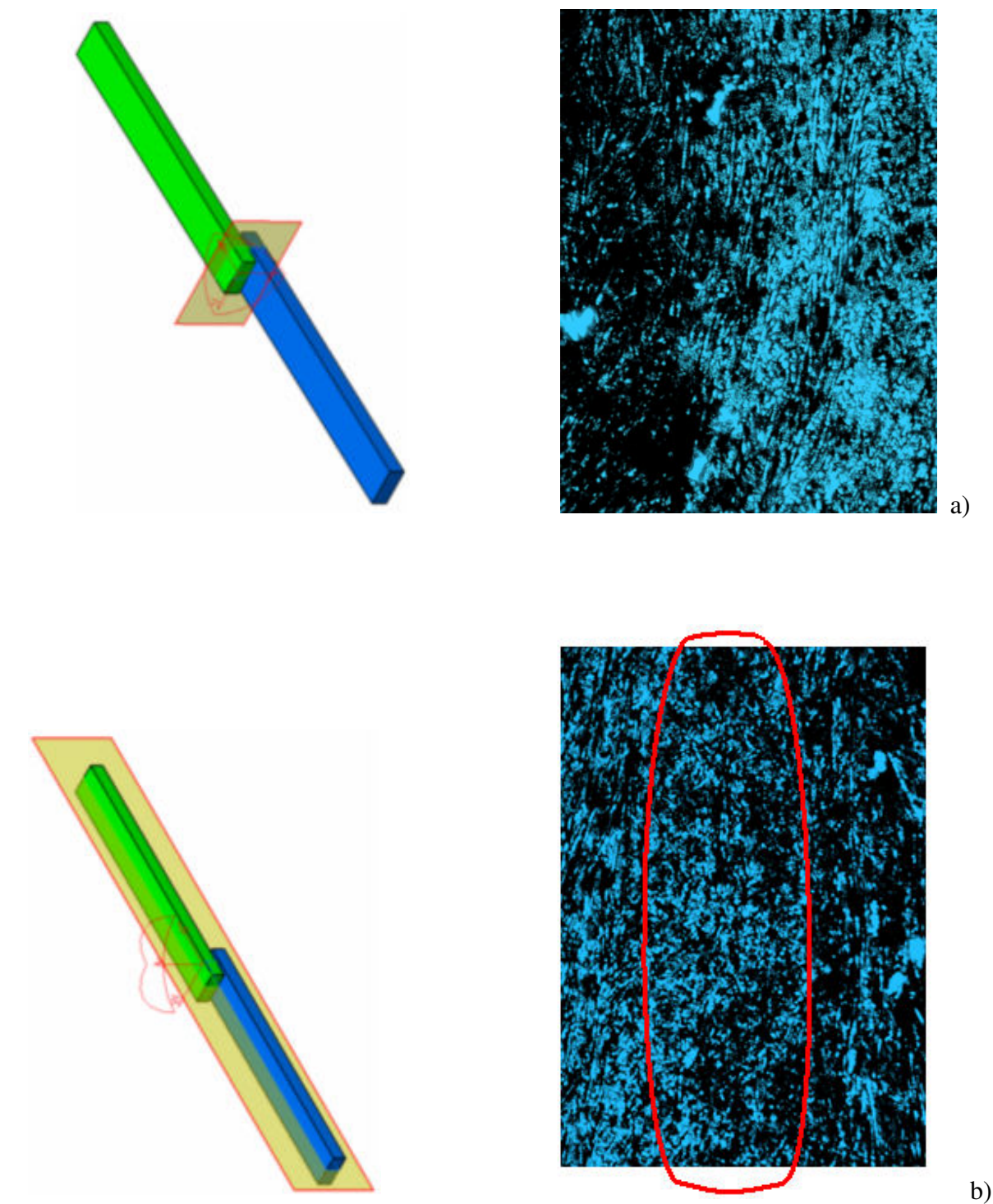
Střední zkušební vzorek ukazuje příčný řez místa usměřovače energie a tomu odpovídá struktura b).

Spodní zkušební vzorek znázorňuje místo podélného řezu vzorkem, kterému odpovídají příslušné struktury c), d). Struktura c) byla odebrána ze střední části vzorku a je zde patrná orientace vláken ve směru toku taveniny a vrstva s chaotickým rozložením vláken tzv. zamrzlá vrstva (viz kap.3.7.1), která vzniká při plnění formy taveninou laminárním tokem. Struktura d) odpovídá podélnému řezu usměřovačem energie. V místě usměřovače energie vzniká zamrzlá vrstva.

Na obr. 4-33 jsou dvě struktury svařených zkušebních vzorků. V levé části obrázku jsou naznačena místa řezů zkušebními vzorky. V pravé části jsou struktury řezů. Struktura a) ukazuje příčný řez svarovým spojem, který je zde velice zřetelný. Ve struktuře b) je červeně označeno místo podélného řezu svarovým spojem.

Příklady dalších struktur jsou uvedeny v příloze 6.





*Obr. 4-33 Vzorky řezů s označeným místem odběru ze zkušebních svařených vzorků – (Celstran GF+PP-45) – zvětšeno 36x*

## 5. DISKUZE VÝSLEDKŮ

Výsledky obsažené v této disertační práci přináší dílčí informace a přispívají ke komplexnějšímu náhledu na chování plastů plněných dlouhými skleněnými vlákny při svařování ultrazvukem. I přes to, že v současné době svařování plastů ultrazvukem v technické praxi vykazuje značný rozvoj, nejsou pro dlouhvláknové kompozitní materiály jednotlivé svařovací parametry dostatečně popsány.

Pokud se jedná o sledování problematiky ultrazvukového svařování plastů plněných dlouhými vlákny, je nutné konstatovat, že k danému tématu existuje velice málo literatury, která by komplexně posuzovala sledovaný problém. Též nové poznatky o procesu svařování, které uvádějí výrobci ultrazvukové svařovací techniky, jsou velmi obecné. Tento nedostatek ovlivnil řešení mé disertační práce i následné stanovení metodiky vyhodnocování experimentálního měření. Některé publikace [6, 7, 28, 32, 34, 35] charakterizují technologické vlastnosti svařování plastů, avšak neukazují komplexní význam všech parametrů pro ultrazvukové svařování dlouhvláknových kompozitních materiálů.

V rámci experimentu byl ke svařování vybrán polypropylen plněný dlouhými skelnými vlákny s různým procentuálním množstvím plniva. Hlavním zkoušeným materiálem byl Celstran +PP-GF45, který má 45% skelných vláken v matrici a pro porovnání byly použity materiály Celstran +PP-GF30 s 30% skelných vláken v matrici a polypropylen bez skelných vláken Tipplen K199 [viz kap.4.1].

Během experimentálních měření byly porovnány dvě metody ultrazvukového svařování – svařovalo se podle času  $t_{sv}$  a podle absolutní vzdálenosti. Metoda svařování podle času byla vybrána, jelikož je jednou z nejstarších a nejpoužívanějších metod. Svařování podle absolutní vzdálenosti bylo vybráno po konzultaci s firmou Dukane. Hlavní důraz byl při experimentech soustředěn na metodu svařování podle času  $t_{sv}$ , pro kterou byly vyrobené vzorky svařeny, provedena zkouška tahem a její vyhodnocení Taguchiho statistikou metodou plánovaného experimentu DOE. Na základě statistických výsledků byl poté metodou svařování podle absolutní vzdálenosti svařován pouze hlavní zkoušený materiál Celstran +PP-GF45.

Zkušebních vzorků z materiálu Celstranu +PP-GF45 bylo vyrobeno více než 500 kusů. U těchto vzorků byla použita metoda svařování podle absolutní vzdálenosti a svařování podle času  $t_{sv}$ . Pouze u metody svařování podle času  $t_{sv}$  bylo provedeno ověření výsledků. Z materiálu Celstranu +PP-GF30 bylo vyrobeno více než 300 zkušebních vzorků pro metodu svařování podle času  $t_{sv}$  a následně provedeno ověření výsledků. Z materiálu Tipplen K 199 se vyrobilo 200 zkušebních vzorků. Svařování bylo provedeno pouze metodou podle času  $t_{sv}$ . Opět je zde nutné uvést, že na základě výsledků statistické metody DOE nebyl materiál Tipplen K 199 svařován metodou podle absolutní vzdálenosti.

## I. Svařování podle času $t_{sv}$

V následující kapitole jsou vyhodnoceny výsledky experimentálních měření pro všechny zkoušené materiály.

### Celstran +PP-GF45

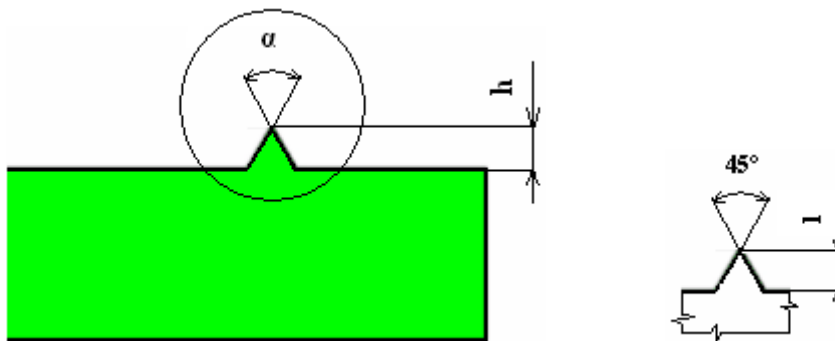
Na základě výsledků experimentů (viz kap. 4.5.1) rozvíjejících teorii ultrazvukového svařování materiálů s dlouhými vlákny jsou nejvýznamnějšími svařovacími parametry z hlediska konstrukce svarových spojů - geometrie usměřovače - jeho výška  $h$  a z hlediska technologických parametrů - čas svařování  $t_{sv}$ .

a) *usměřovač energie*, který slouží k dosažení vysokých hustot energie v zóně svaru a tím dochází k rychlému natavení materiálu, je nejlepší pro tento materiál:

- s výškou  $h = 1\text{mm}$  a úhlem  $\alpha = 45^\circ$ , při této geometrii usměřovače energie byla nejvyšší naměřená pevnost svarového spoje  $\sigma R_m = 44,29\text{ MPa}$ .

Nejhorších výsledků pevnosti svarových spojů bylo dosaženo s usměřovačem energie:

- výška  $h = 0,5\text{mm}$  a úhel  $\alpha = 45^\circ$ , kdy byla naměřena pevnost svarového spoje  $\sigma R_m = 8,37\text{ MPa}$ .



Obr. 5-1 Schéma usměřovače energie s jeho detailem

b) *čas svařování*  $t_{sv}$  je rozhodující pro Brownův makropohyb makromolekul a přechod do stavu taveniny. Pro Celstran +PP-GF45 byl naměřen jako nejlepší  $t_{sv} = 1$  s. Tato hodnota času svařování byla ověřena dalšími experimenty na základě výsledků z Taguchiho statistické metody. Při těchto ověřovacích experimentech byl potvrzen jako nejlepší čas svařování  $t_{sv} = 1$  s.

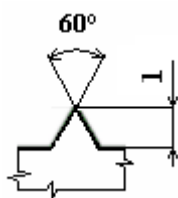
Dalším důležitým parametrem svařování je *svařovací tlak*  $p_{sv}$  (přítlačná síla), který byl u Celstranu +PP-GF45 naměřen jako třetí nejvýznamnější parametr s hodnotou  $p_{sv} = 25$  kPa. Tato hodnota byla potvrzena i u ověřovacích experimentů, i když pevnosti svarových spojů při změnách nastavení svařovacího tlaku značně kolísaly.

### Celstran +PP-GF30

a) *usměrňovač energie* - pro tento materiál byla nejlepší geometrie usměrňovače definována:  
- výška  $h = 1$  mm a úhel  $\alpha = 60^\circ$ , nejvyšší naměřená pevnost svarového spoje  $\sigma R_m = 46,69$  MPa.

Nejhorších výsledků pevnosti svarových spojů bylo dosaženo s usměrňovačem energie:

- výška  $h = 0,5$  mm a úhel  $\alpha = 45^\circ$ , kdy byla naměřena pevnost svarového spoje  $\sigma R_m = 38,74$  MPa.



Obr. 5-2 Schéma detailu usměrňovače energie

b) *čas svařování*  $t_{sv}$  – jako optimální vyšel  $t_{sv} = 0,8$  s. Při ověřovacích experimentech bylo ale dosaženo největších pevností svarových spojů při  $t_{sv} = 1$  s.

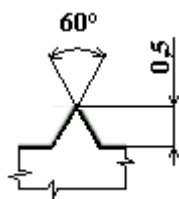
Pro Celstran +PP-GF30 byl vyhodnocen *svařovací tlak*  $p_{sv}$  dokonce jako druhý nejvýznamnější svařovací parametr, ovšem s hodnotou  $p_{sv} = 23$  kPa. Při ověřovacích experimentech pevnosti svarových spojů kolísaly stejně jako u Celstranu +PP-GF45, ale nejvyšší pevnost svarových spojů byla naměřena při  $p_{sv} = 29$  kPa.

### Tipplen K199

a) Pro Tipplen K199 vychází z naměřených hodnot jako nejlepší *geometrie usměrňovače*: výška  $h = 0,5$  mm, úhel usměrňovače energie  $\alpha = 60^\circ$ . Při této geometrii usměrňovače energie byla nejvyšší naměřená pevnost svarového spoje  $\sigma R_m = 26,15$  MPa. Při výšce  $h = 1$  mm docházelo k vytvoření velkého výronku hmoty ze svarového spoje.

Nejhorších výsledků pevnosti svarových spojů bylo dosaženo s usměrňovačem energie:

- výška  $h = 1$  mm a úhel  $\alpha = 60^\circ$ , kdy byla naměřena pevnost svarového spoje  $\sigma R_m = 21,85$  MPa.



Obr. 5-3 Schéma detailu usměrňovače energie

b) Pro Tipplen K199 byl naměřen jako optimální *čas svařování*  $t_{sv} = 1$  s.

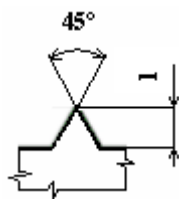
U Tipplenu K 199 byl dosažen nejlepší *svařovací tlak*  $p_{sv} = 20$  kPa. Při vyšších hodnotách svařovacího tlaku  $p_{sv}$  nedosahovaly svarové spoje tak velkých pevností a navíc docházelo k výronku hmoty ze svarového spoje.

Při ultrazvukovém svařování s obecným usměrňovačem energie přechází hmota ze stavu tuhého do viskózního pouze v usměrňovači energie. Okolní materiál se od taveniny z usměrňovače energie již jen natavuje. Z tohoto důvodu je výhodnější pro materiály se skelnými vlákny větší výška usměrňovače  $h = 1$  mm, jelikož dochází k natavení většího objemu matrice.

## II. Svařování podle absolutní vzdálenosti

Nejvýznamnějšími svařovacími parametry z pohledu metody svařování podle zvolené absolutní vzdálenosti  $e = 8,15$  mm (viz kap. 4.5.3) je geometrie usměrňovače, jeho výška  $h$  a úhel  $\alpha$ . Nejvyšší hodnoty pevností svarových spojů  $\sigma R_m = 42,8$  MPa byly naměřeny u zkoušeného materiálu Celstran +PP-GF45 při výšce  $h = 1$  mm a úhlu  $\alpha = 45^\circ$ .





Obr. 5-4 Schéma detailu usměrňovače energie

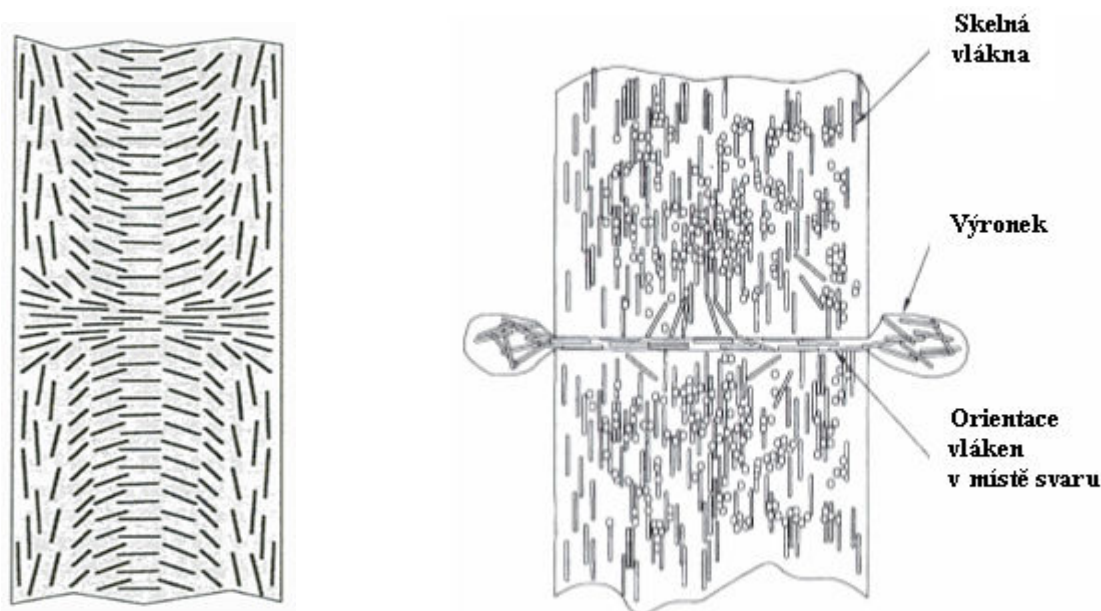
Rozdíly nejvyšších průměrných pevností svarových spojů z jednotlivých experimentů, provedených u použitých metod svařování podle času  $t_{sv}$  a podle absolutní vzdálenosti jsou nepatrné. U metody svařování podle absolutní vzdálenosti jsou však hodnoty pevností svarových spojů vyrovnané. Při svařování podle absolutní vzdálenosti, každé zvýšení či snížení vzdálenosti  $e$  znamená pokles resp. zvýšení pevnosti svarového spoje. Při vzdálenosti  $e$  menší, než 8,15 mm, došlo ke vzniku výronku taveniny ze svarového spoje, ale tyto svarové spoje vykazovaly větší průměrnou pevnost při zkoušce tahem, než svarové spoje svařené se vzdáleností  $e$  rovno 8,15 mm a větší.

### III. Pevnost svarových spojů

a) Pro materiály plněné dlouhými skelnými vlákny - Celstran +PP-GF45 byla dosažena nejvyšší průměrná pevnost svarového spoje  $\sigma R_m = 44,29$  MPa a průměrná pevnost kompozitního materiálu při zkoušce tahem byla  $\sigma R_m = 135,71$  MPa (viz příloha č.1). Pro Celstran +PP-GF30 byla dosažena nejvyšší průměrná pevnost svarového spoje  $\sigma R_m = 46,69$  MPa a průměrná pevnost kompozitního materiálu při zkoušce tahem byla  $\sigma R_m = 103,33$  MPa (viz příloha č.1).

Důvodem nízké pevnosti svarového spoje je procentuální obsah skelných vláken v matrici (při větším procentuálním obsahu plniva v matrici, dochází ke snižování pevnosti svarového spoje z důvodu malého množství matrice), anizotropie orientace a krátký čas svařování. Vlivem vysoké rychlosti svařování ultrazvukem, nelze v tak krátkém čase uspořádat dlouhá vlákna a tím vzniká nepříznivý směr orientace. Vlákna se uspořádají v rovině svarového spoje kolmé k tlakovému působení sonotrody, což je rovina kolmá na směr působení síly  $F_{max}$ , proto má svarový spoj nižší pevnost než základní materiál kompozitu. V ostatních místech součásti jsou vlákna orientovaná nahodile, v závislosti na vstřikovacích podmínkách a umístění vtoku. Výhodou vysoké rychlosti svařování ultrazvukem je, že nedochází ke vzniku vrstvy materiálu

ovlivněné okolním prostředím (kyslíkem, vlhkostí), která by pak snižovala schopnost spojení svařovaných materiálů.



*Obr. 5-5 Schéma rozložení vláken ve svařovaném materiálu - vlevo na začátku svařování  
- vpravo po svařování [34]*

b) U polypropylenu bez skelných vláken byla dosahovaná pevnost svarových spojů srovnatelná s pevností základního materiálu. U tohoto materiálu dochází pouze k orientaci makromolekul, která se zde nejeví jako zásadní pro ovlivnění pevnosti svarových spojů. Nejvyšší dosažená průměrná pevnost svarového spoje u Tipplenu K 199 byla  $\sigma R_m = 26,15$  MPa a průměrná pevnost základního materiálu dosažená při zkoušce tahem byla  $\sigma R_m = 26,88$  MPa, viz příloha č.1.

**IV.** Experimentální měření v rámci disertační práce bylo vyhodnoceno na základě Taguchiho statistické metody plánovaného experimentu DOE. Zvolená statistická metoda přispěla k vyhodnocení důležitosti svařovacích parametrů.

Na základě provedených experimentů a jejich vyhodnocení, vycházejí pro zkoušené materiály:

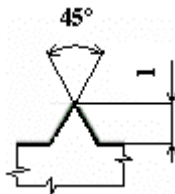
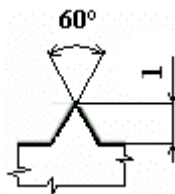
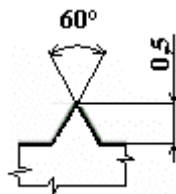
a) Celstran +PP-GF45

b) Celstran +PP-GF30

c) Tipplen K 199

jako nejlepší svařovací parametry hodnoty uvedené v tabulce 6.1.

**Tab. 5.1 Nejvhodnější parametry ultrazvukového svařování**

Parametr	Celstran +PP-GF45	Celstran +PP-GF30	Tipplen K 199
geometrie usměrňovače energie			
čas svařování $t_{sv}$	$t_{sv} = 1 \text{ s}$	$t_{sv} = 0,8 \text{ s}$	$t_{sv} = 1 \text{ s}$
svařovací tlak $p_{sv}$	$p_{sv} = 25 \text{ kPa}$	$p_{sv} = 23 \text{ kPa}$	$p_{sv} = 20 \text{ kPa}$

Metodou DOE byly vyhodnoceny jako nejméně vhodné parametry pro ultrazvukové svařování níže uvedených zkoušených materiálů následující parametry:

a) Celstran +PP-GF45 - geometrie usměrňovače  $h = 0,5 \text{ mm}$ ,  $\alpha = 45^\circ$ ,  $t_{sv} = 0,6 \text{ s}$ ,  $p_{sv} = 20 \text{ kPa}$ .

b) Celstran +PP-GF30 - geometrie usměrňovače  $h = 0,5 \text{ mm}$ ,  $\alpha = 45^\circ$ ,  $t_{sv} = 0,6 \text{ s}$ ,  $p_{sv} = 20 \text{ kPa}$ .

c) Tipplen K 199 - geometrie usměrňovače  $h = 1 \text{ mm}$ ,  $\alpha = 60^\circ$ ,  $t_{sv} = 0,6 \text{ s}$ ,  $p_{sv} = 25 \text{ kPa}$ .

## 6. ZÁVĚR

V předložené disertační práci na téma svařování dlouhvláknových PP kompozitů ultrazvukem je řešen vliv změny vybraných svařovacích parametrů na pevnost svarového spoje. Její výsledky přispívají k rozšíření poznatků o vlivu jednotlivých svařovacích parametrů na pevnost svarového spoje.

Práce je rozdělena do dvou okruhů:

1. Rešeršní část je věnována technologii ultrazvukového svařování, charakteristice svařovaných kompozitních materiálů a vlivu procesu vstřikování na svařitelnost kompozitních materiálů.
2. Experimentální část práce byla zaměřena na sledování svařovacích parametrů při svařování ultrazvukem pro vybrané materiály Celstran+PP-GF45, Celstran+PP-GF30 a Tiplen K199, které obsahovaly různé množství skelného vlákna jako plniva. Bylo provedeno celkem 750 experimentů, které byly rozděleny do dvou skupin s ohledem na čas svařování a svařování podle absolutní vzdálenosti.

Získané výsledky experimentů byly statisticky vyhodnoceny metodou plánovaného experimentu (DOE) s ohledem na vliv parametrů svařování ultrazvukem (čas svařování  $t_{sv}$ , svařovací tlak  $p_{sv}$ , čas chladnutí svaru  $t_{ch}$ , tlak při chladnutí svaru  $p_{ch}$ , výška usměrňovače energie  $h$ , úhel usměrňovače energie  $\alpha$  a amplituda  $A$ ).

Získané poznatky a výsledky při řešení této disertační práce lze shrnout do těchto dílčích závěrů:

- 1) Byla navržena a provedena metodika měření vybraných svařovacích parametrů a to času svařování  $t_{sv}$ , svařovacího tlaku  $p_{sv}$ , času chladnutí svaru  $t_{ch}$ , tlaku při chladnutí svaru  $p_{ch}$ , výšky usměrňovače energie  $h$ , úhlu usměrňovače energie  $\alpha$  a amplitudy  $A$ . K tomuto účelu byly vyrobeny zkušební vzorky s rozdílnou geometrií usměrňovače energie.
- 2) Na základě celkového hodnocení naměřených hodnot v mé disertační práci bylo zjištěno, že při svařování ultrazvukem může dojít k výrazně odlišným výsledkům. Důvody pro to mohou být různé. V první řadě jsou to vlastnosti podmíněné materiálem, jako je hustota, modul pružnosti, součinitel tření a tvarová stálost za tepla. K tomu pak přistupují parametry dané přístroji, jako je tlak, amplituda, doba svařování, geometrie spojovaných ploch,

provedení nástroje a uchycení. U hotového výrobku se následkem víření taveniny ve formě vyskytují oblasti s různým směrem orientace vláken, i proto jsou získávány nestejně výsledky.

3) Zvolená statistická metoda – metoda Taguchiho plánovaného experimentu (DOE) přispěla k vyhodnocení důležitosti svařovacích parametrů. Tato metoda umožňuje současně sledovat vliv více proměnných (faktorů) na sledovanou závisle proměnnou (odezvu), což je pro vyhodnocení svařování plastů ultrazvukem důležité. Analýza výsledků prokázala kombinaci faktorů svařování.

4) Na základě metody DOE byl optimalizován technologický proces ultrazvukového svařování vzorků z kompozitních materiálů Celstran+PP-GF45, Celstran+PP-GF30 a Tipplenu K199 za účelem dosažení maximální pevnosti svaru představovaném maximální silou v tahu. Tato síla představuje kritický znak jakosti svaru.

5) Ze sedmi proměnných faktorů výsledky statistické analýzy ukázaly, že geometrie usměrňovače energie - výška  $h$ , resp. úhel  $\alpha$  a čas svařování  $t_{sv}$  jsou hlavní faktory ovlivňující vlastnosti svarových spojů při ultrazvukovém svařování termoplastů plněných dlouhými skelnými vlákny a stejně tak i u polypropylenu neplněného.

6) Svařitelnost polypropylenu ultrazvukem je dobrá. Z výsledků experimentů je zřejmé, že při určitých podmínkách lze dosáhnout relativně pevných a konzistentních svarových spojů i u polypropylenu plněného dlouhými skelnými vlákny.

7) Při svařovacím procesu musí být objem usměrňovače energie dostatečně velký, aby po roztavení pokryl co největší styčnou plochu svařovaných dílů, ovšem bez výronku hmoty mimo spoj. Výškou usměrňovače energie ovlivňujeme výslednou pevnost svarového spoje. Prodlužováním svařovacího času nad optimální hodnotu dojde k výronku plastu po obvodu svaru. Pevnost svarového spoje se však nezvýší.

Maximální pevnost svarového spoje  $\sigma R_m$  byla dosažena pro Celstran +PP-GF30 – 46,69 MPa u série experimentů č.14.

U Celstranu +PP-GF45 byla dosažena maximální pevnost  $\sigma R_m = 44,29$  MPa u série experimentů č.16.

U Tipplenu K199 byla dosažena maximální pevnost  $\sigma R_m = 26,15$  MPa u série experimentů č.6, což odpovídá pevnosti základního materiálu.

8) Pro průmyslové využití těchto poznatků je nutno vzít na zřetel materiál s množstvím skelného vlákna, tvar a rozměr svařovaného tělesa, velikost a tvar sonotrody, parametry svařování, seřízení celého svařovacího zařízení.



Z tohoto hlediska lze brát v úvahu výsledky mé disertační práce za informativní, neboť pro každý jiný experiment je nutno vše odzkoušet.

Vlastní přínosy práce:

Práce shrnuje a rozšiřuje poznatky v oblasti svařování dlouhvláknových PP kompozitů ultrazvukem a vliv jednotlivých svařovacích parametrů na pevnost svarového spoje. V disertační práci jsou uvedeny hodnoty svařovacích parametrů pro materiál Celstran se dvěma různými obsahy skelného vlákna (30 % a 45 %) a pro kopolymer PP. Tak lze získat poměrně jasnou představu o svařování plastů ultrazvukem. V disertační práci bylo ověřeno, že lze použít pro vyhodnocení pevnosti svarových spojů zvolenou statistickou metodu plánovaného experimentu DOE.

Jsem si vědoma, že tato disertační práce řeší jen určitou část problematiky svařování plastů ultrazvukem. Rozsah experimentálního měření nepokryl všechny možné kombinace proměnných vstupních faktorů, které jsou nutné k získání obecnějších závěrů.

Poznatky a závěry této disertační práce mohou být uplatněny při řešení technologických problémů při svařování plastů ultrazvukem, především Celstranu s různým obsahem plniva v podobě skelných vláken.

Disertační práce vznikla s podporou výzkumného záměru MSM 4674788501



## 7. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] KREBS, J.: Teorie zpracování nekovových materiálů, TUL 2006, ISBN 80-7372-133-3.
- [2] ŠVEHLA, Š.- FIGURA, Z.: Ultrazvuk v technologii, ALFA, Bratislava, 1984.
- [3] TATAR, M.: Ultrazvuk ve strojírenství, SNTL, Praha, 1962.
- [4] PTÁČEK, L. a kol.: Nauka o materiálu, CERM, Brno, 2001, ISBN 80-7204-130-4.
- [5] LENFELD, P.: Technologie II. – 2.část, TUL 2006, ISBN 80-7372-037-X.
- [6] NEMCOVÁ, V.; KHANDL, F.: Spájanie plastov, VÚS - WELDTECH Bratislava, 1995.
- [7] LOYDA, M. a kol.: Svařování termoplastů, UNO, Praha, 2001, ISBN 80-238-6603-6.
- [8] Kolektiv autorů: Plasty pro rozvod médií a svařované konstrukce, GAS s.r.o. Praha 2001, ISBN 80-86176-97-5.
- [9] ŠTĚPEK, J.; ZELINGER, J.; KUTA, A.: Technologie zpracování a vlastnosti plastů. SNTL, Praha, 1989.
- [10] KOLOUCH, J.: Strojírenské výrobky z plastů vyráběné vstřikováním, SNTL, Praha 1986.
- [11] MLEZIVA, J.; KÁLAL, J.: Základy makromolekulární chemie, SNTL/ALFA, Praha 1986.
- [12] PLUHAŘ, J. a kol.: Nauka o materiálu, SNTL/ALFA Praha, 1989.
- [13] MEISSNER, B.; ZILVAR, V.: Fyzika polymerů, SNTL, Praha, 1987. ISBN 04-634-87.
- [14] DUCHÁČEK, V.: Polymery - výroba, vlastnosti, zpracování, použití, VŠCHT Praha, 2006, ISBN 80-7080-617-6
- [15] DAĐOUREK, K.: Kompozitní materiály – druhy a jejich využití, TUL 2007, ISBN 978-80-7372-279-1.
- [16] BAREŠ, R.A.: Kompozitní materiály, SNTL, Praha, 1988.
- [17] HUGO, J. a kol.: Příručka pro konstruktéry, SVÚT Praha, 1989
- [18] ČSN EN 12814-2 : Zkoušení svarových spojů polotovarů termoplastů
- [19] ČSN EN ISO 527 -1: Plasty – stanovení tahových vlastností – část 1: Základní principy. Český normalizační institut , Praha, 1997.
- [20] KADERÁBEK, J.: Statistika. TUL 2006, ISBN 80-7372-044-2.
- [21] DAĐOUREK, K.: Statistika v excelu. TUL 2003, ISBN 80-7083-694-6.
- [22] KOUCKÝ, M.; MAČÁK, K.: Matematika v excelu. TUL 2003, ISBN 80-7083-747-0.
- [23] Firemní literatura firmy DUKANE



- [24] Firemní literatura firmy BRANSON
- [25] Firemní literatura firmy HERRMANN
- [26] Firemní literatura firmy TICONA
- [27] SOBOTKA, Z.: Reologie hmot a konstrukcí. Academia, ČSAV Praha, 1981
- [28] ROOPA, M.; PRAKASAN, K.; RUDRAMOORTHY, R.: Designing Joints for Ultrasonic Welding of Plastics. Welding journal, 2005, č.9, s. 50-54.
- [29] DEVINE, J.: Ultrasonic Plastics Welding Basics. Welding journal, 2001, č.1, s. 29-33.
- [30] <http://www.branson-plasticsjoint.com/>
- [31] <http://www.forwardtech.com/>
- [32] Engineered Materials Handbook. Volume2 – Engineering Plastics. ASM International 1988.
- [33] <http://www.staplultrasonics.com>
- [34] MALLOY, R.A.: Plastic Part Design for Injection Molding. Hanser Verlag, New York 1994, ISBN 1-56990-129-5.
- [35] TROUGHTON, M.J.: Handbook of plastics joining a practical guide. Cambridge, UK: TWI/ The Welding Institute, New York 2008, ISBN 978-0-8155-1581-4.
- [36] <http://en.wikipedia.org/wiki/Polypropylene>





## 8. SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1** Tahová zkouška
- Příloha 2** Tahová zkouška svařených materiálů před optimalizací svařovacích parametrů
- Příloha 3** Tahová zkouška svařených materiálů po optimalizaci svařovacích parametrů
- Příloha 4** Grafy – Vliv proměnných faktorů na ultrazvukové svařování pro zkoušené materiály - Celstran+PP-GF45, Celstran+PP-GF30 a Tipplen K199, svařované podle času
- Příloha 5** Grafy – Vliv proměnných faktorů na ultrazvukové svařování pro Celstran+PP-GF45, svařovaný podle absolutní vzdálenosti
- Přílohy 6** Struktury



## STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

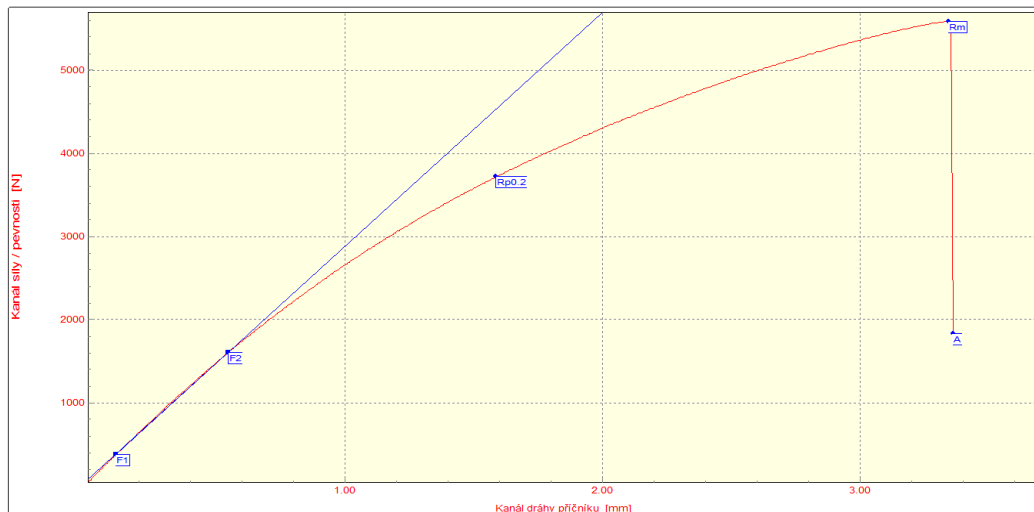
### VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: : Celstran GF 45  
Norma: : ČSN EN ISO 527-1  
Rozměr vzorku: : 4x10 mm  
Směr odebrání vzorku : ---  
Rychlost zatěžování: : 30 mm/min  
Datum zkoušky: : 20.6.2008  
Vypracoval: : Ing. Lenka Frajtová

### VÝSTUPNÍ HODNOTY

Číslo zkoušky	A %	Rm MPa	Rp0.2 MPa	Fm N
1	2.33	139.66	92.92	5586.30
2	3.17	136.77	87.83	5470.90
3	2.60	136.69	95.40	5467.60
4	2.08	128.66	94.07	5146.40
5	3.33	136.77	90.70	5470.90

Statistická hodnota	A %	Rm MPa	Rp0.2 MPa	Fm N
Počet zkoušek	5.00	5.00	5.00	5.00
Průměrná hodnota	2.70	135.71	92.18	5428.42
Směrodatná odchylka	0.54	4.14	2.98	165.53





## STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

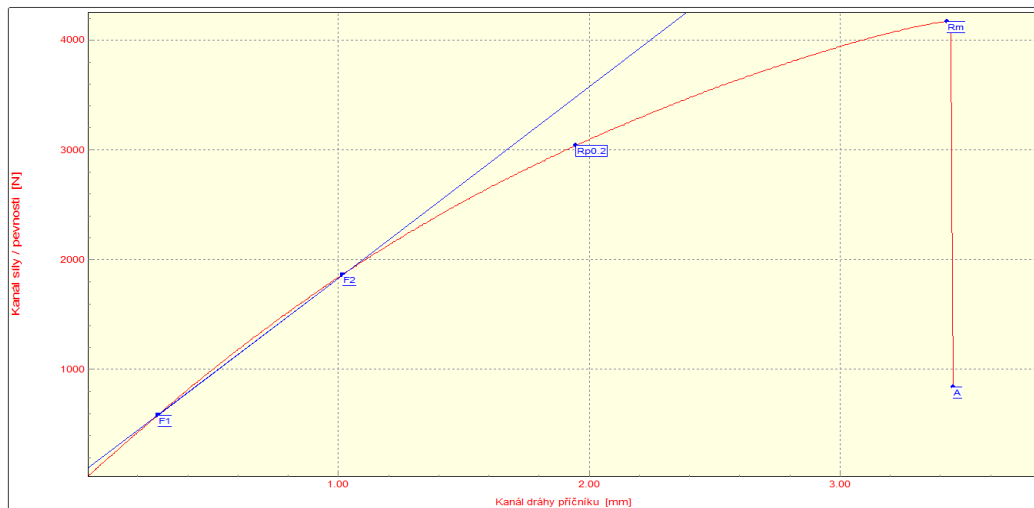
### VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: : Celstran GF 30  
Norma: : ČSN EN ISO 527-1  
Rozměr vzorku: : 4x10 mm  
Směr odebrání vzorku : ---  
Rychlost zatěžování: : 30 mm/min  
Datum zkoušky: : 20.6.2008  
Vypracoval: : Ing. Lenka Frajtová

### VÝSTUPNÍ HODNOTY

Číslo zkoušky	A %	Rm MPa	Rp0.2 MPa	Fm N
1	3.00	104.26	76.00	4170.60
2	2.71	104.43	76.50	4177.20
3	3.18	102.33	74.62	4093.40
4	2.87	101.86	86.48	4074.30
5	3.08	103.78	75.71	4151.00

Statistická hodnota	A %	Rm MPa	Rp0.2 MPa	Fm N
Počet zkoušek	5.00	5.00	5.00	5.00
Průměrná hodnota	2.97	103.33	77.86	4133.30
Směrodatná odchylka	0.18	1.17	4.87	46.65



### TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Katedra strojírenské technologie  
Oddělení tváření kovů a plastů  
Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>



## STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

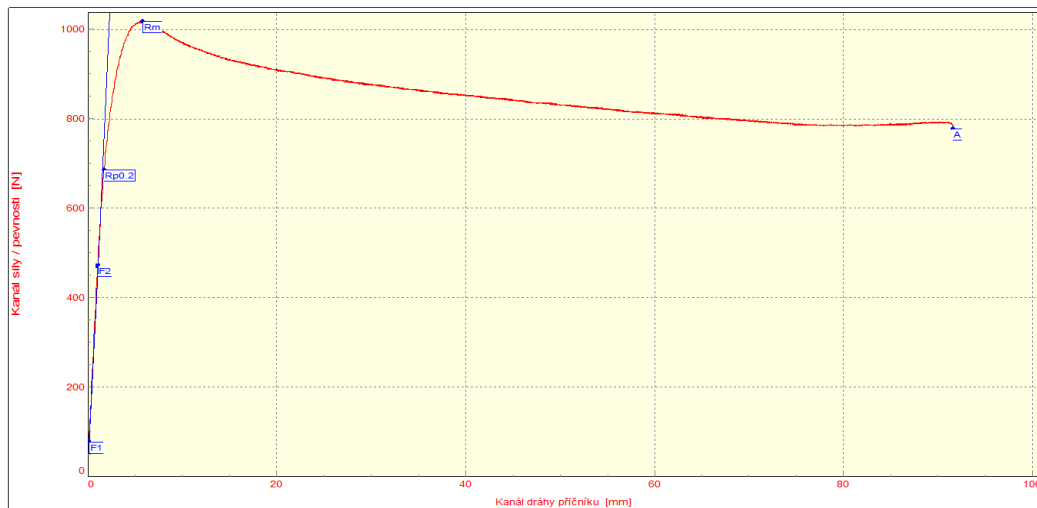
### VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: : Tipplen K199  
Norma: : ČSN EN ISO 527-1  
Rozměr vzorku: : 4x10 mm  
Směr odebrání vzorku: : ---  
Rychlost zatěžování: : 30 mm/min  
Datum zkoušky: : 20.6.2008  
Vypracoval: : Ing. Lenka Frajtová

### VÝSTUPNÍ HODNOTY

Číslo zkoušky	A %	Rm MPa	Rp0.2 MPa	Fm N
1	122.80	27.94	19.31	1117.40
2	111.96	27.21	18.30	1088.50
3	67.26	27.04	18.48	1081.50
4	108.00	26.79	18.12	1071.60
5	117.93	25.44	17.12	1017.80

Statistická hodnota	A %	Rm MPa	Rp0.2 MPa	Fm N
Počet zkoušek	5.00	5.00	5.00	5.00
Průměrná hodnota	105.59	26.88	18.26	1075.36
Směrodatná odchylka	22.16	0.91	0.79	36.42



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů

Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>



## Příloha 2 str.1/3

**Celstran +PP-GF45** - zkouška tahem - vzorky svařené před optimalizací svařovacích parametrů, pro experiment č.18

# STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

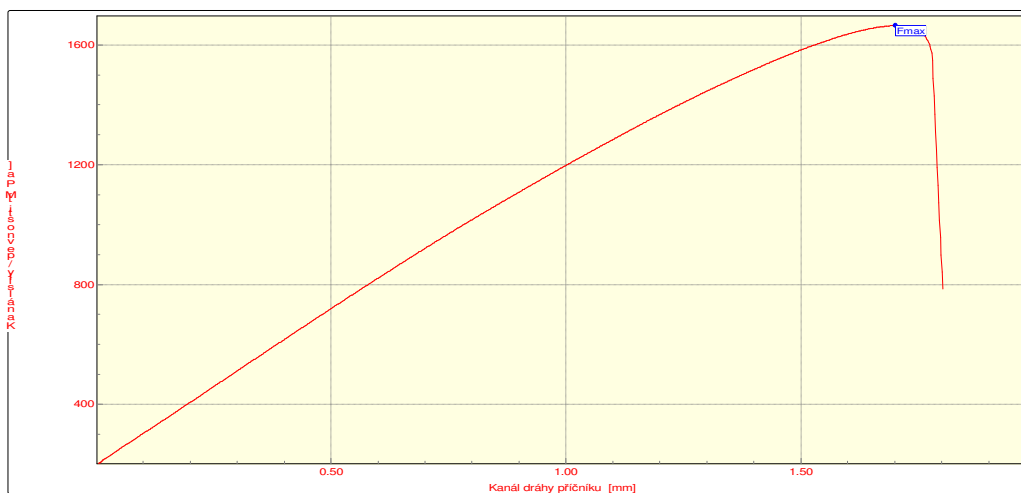
## VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: : Celstran +PP GF-45  
Norma: : ČSN EN ISO 527-1  
Rozměr vzorku: : (4x10) mm  
Rychlost zatěžování: : 20mm/min  
Vypracoval: : Ing. Lenka Frajťová  
Datum zkoušky: : 10.2.2009  
Směr odebrání vzorku: : ---

Číslo zkoušky	$R_m$ MPa	$F_{max}$ N
1	43,8	1751
2	44,8	1791
3	42,9	1717
4	43,3	1734
5	41,6	1665
6	38	1520
7	39,5	1581
8	41,1	1641

## VÝSTUPNÍ HODNOTY

Statistická hodnota	$R_m$ MPa	$F_{max}$ N
Počet zkoušek	8	8
Průměrná hodnota	41,87	1675
Směrodatná odchylka	2,28	91,5



## TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Katedra strojírenské technologie  
Oddělení tváření kovů a plastů  
Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>



## Příloha 2 str.2/3

**Celstran+PP-GF30** - zkouška tahem - vzorky svařené před optimalizací svařovacích parametrů, pro experiment č.16

# STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

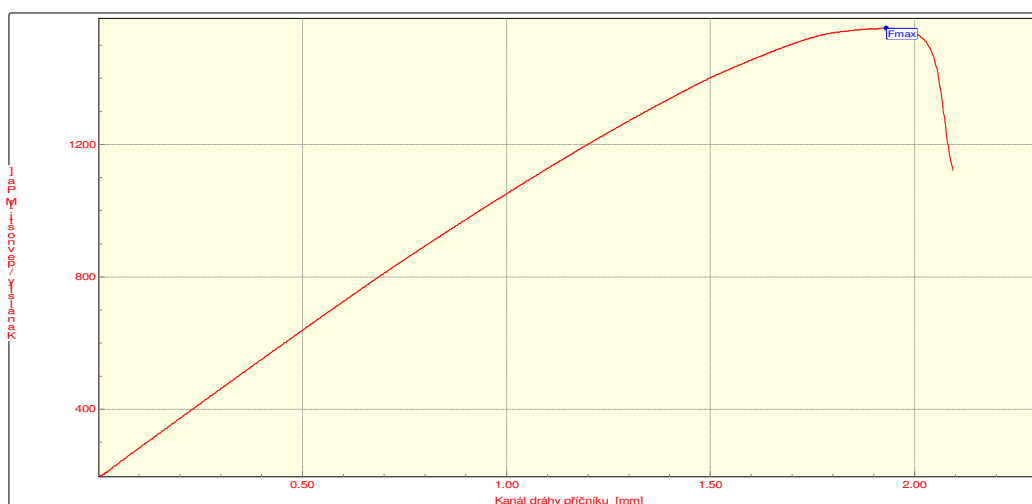
## VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: : Celstran+PP GF-30  
Norma: : ČSN EN ISO 527-1  
Rozměr vzorku: : 4x10  
Rychlost zatěžování: : 20mm/min  
Vypracoval: : Ing. Lenka Frajtová  
Datum zkoušky: : 10.2.2009  
Směr odebrání vzorku : ---

Číslo zkoušky	$R_m$ MPa	$F_{max}$ N
1	38,9	1557
2	38,8	1552
3	38,7	1551
4	41,7	1670
5	40,6	1627
6	39	1560
7	40,2	1609
8	40	1602

## VÝSTUPNÍ HODNOTY

Statistická hodnota	$R_m$ MPa	$F_{max}$ N
Počet zkoušek	8	8
Průměrná hodnota	39,73	1591
Směrodatná odchylka	1,07	43,45



## TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Katedra strojírenské technologie  
Oddělení tváření kovů a plastů  
Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>



## Příloha 2 str.3 /3

**Tipplen K199** - zkouška tahem - vzorky svařené před optimalizací svařovacích parametrů,  
pro experiment č.9

# STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

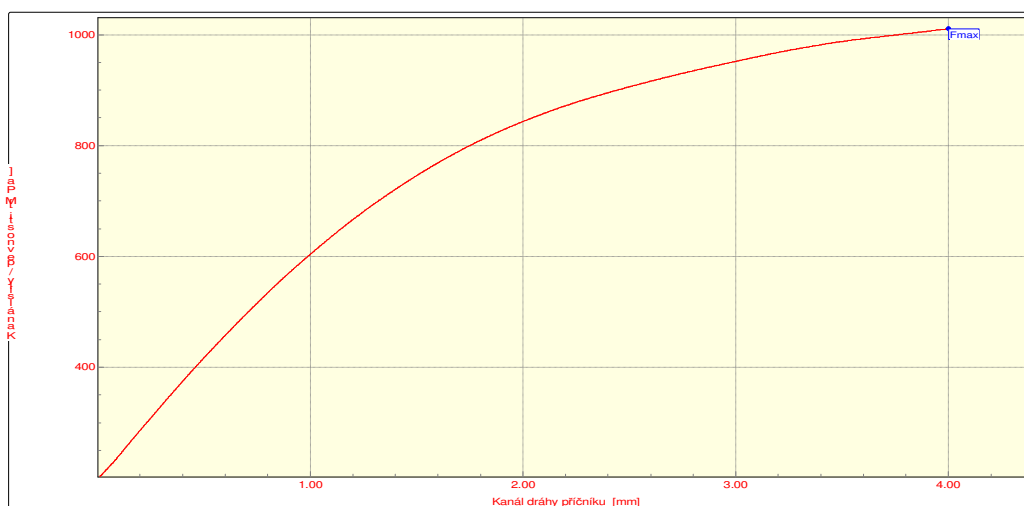
## VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: : TIPPLEN K199  
Norma: : ČSN EN ISO 527-1  
Rozměr vzorku: : 4x10  
Rychlost zatěžování: : 20mm/min  
Vypracoval: : Ing. Lenka Frajtová  
Datum zkoušky: : 10.2.2009  
Směr odebrání vzorku : ---

Číslo zkoušky	$R_m$ MPa	$F_{max}$ N
1	25,3	1011
2	25,7	1029
3	26	1040
4	25,8	1031
5	25,5	1021
6	25,8	1034
7	25,9	1035
8	25,3	1015

## VÝSTUPNÍ HODNOTY

Statistická hodnota	$R_m$ MPa	$F_{max}$ N
Počet zkoušek	8	8
Průměrná hodnota	25,66	1027
Směrodatná odchylka	0,26	10,27



## TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCÍ

Katedra strojírenské technologie  
Oddělení tváření kovů a plastů  
Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>



Příloha 3 str.1/3

Celstran+PP-GF45 - zkouška tahem - vzorky svařené po optimalizaci svařovacích parametrů

## STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

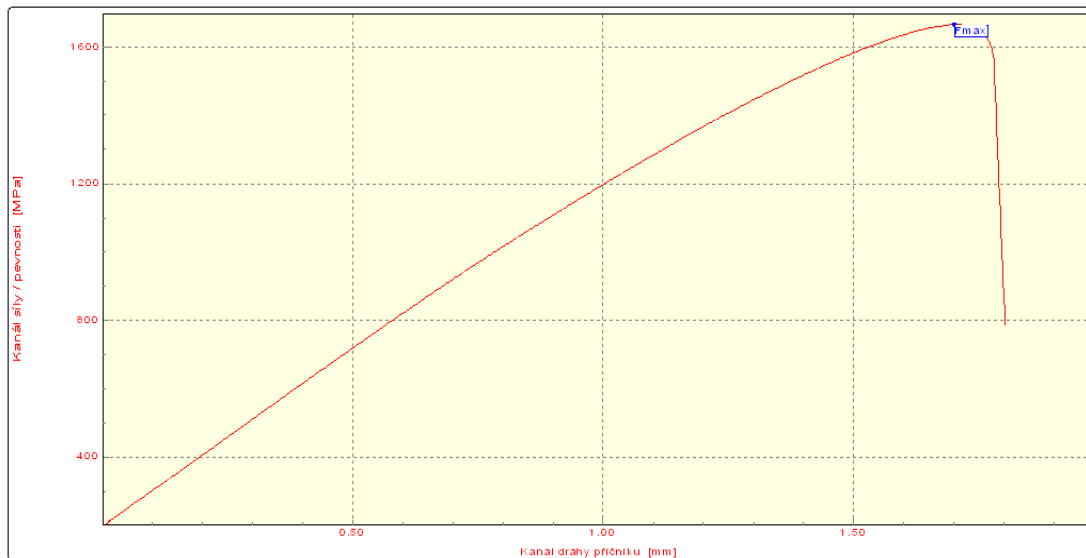
### VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: : Celstran +PP GF-45 nové  
Norma: : ČSN EN ISO 527-1  
Rozměr vzorku: : (4x10) mm  
Rychlost zatěžování: : 20mm/min  
Vypracoval: : Ing. Lenka Frajťová  
Datum zkoušky: : 21.5.2009  
Směr odebrání vzorku: : ---

### VÝSTUPNÍ HODNOTY

Číslo zkoušky	$R_m$ MPa	$F_{max}$ N
1	43,4	1736
2	45,4	1817
3	42,8	1713
4	44,9	1794
5	43,2	1727
6	42,4	1697
7	42,3	1694
8	42,6	1706

Statistická hodnota	$R_m$ MPa	$F_{max}$ N
Počet zkoušek	8	8
Průměrná hodnota	43,4	1736
Směrodatná odchylka	1,16	46



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Katedra strojírenské technologie  
Oddělení tváření kovů a plastů





### Příloha 3 str.2/3

### Celstran+PP-GF30 - zkouška tahem - vzorky svařené po optimalizaci svařovacích parametrů

## STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

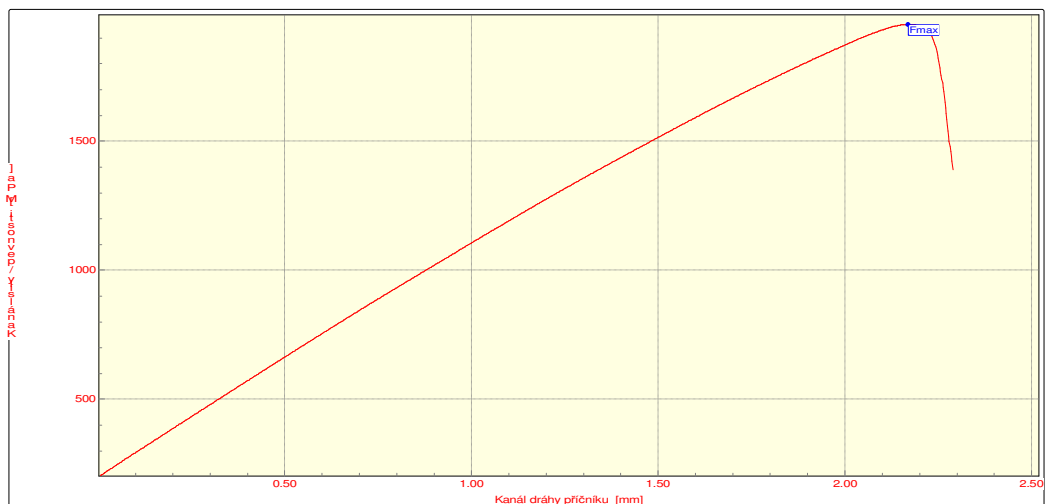
### VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: : Celstran +PP GF-30 - nově  
Norma: : ČSN EN ISO 527-1  
Rozměr vzorku: : (4x10) mm  
Rychlost zatěžování: : 20mm/min  
Vypracoval: : Ing. Lenka Frajtová  
Datum zkoušky: : 21.5.2009  
Směr odebrání vzorku: : --

### VÝSTUPNÍ HODNOTY

Číslo zkoušky	$R_m$ MPa	$F_{max}$ N
1	45	1800
2	48,8	1952
3	47,1	1884
4	48,7	1951
5	48,4	1936
6	46,3	1854
7	48	1920
8	46,1	1845

Statistická hodnota	$R_m$ MPa	$F_{max}$ N
Počet zkoušek	8	8
Průměrná hodnota	47,3	1893
Směrodatná odchylka	1,4	56



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Katedra strojírenské technologie  
Oddělení tváření kovů a plastů



### Příloha 3 str.3/3

### Tipplen K199 - zkouška tahem - vzorky svařené po optimalizaci svařovacích parametrů

## STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

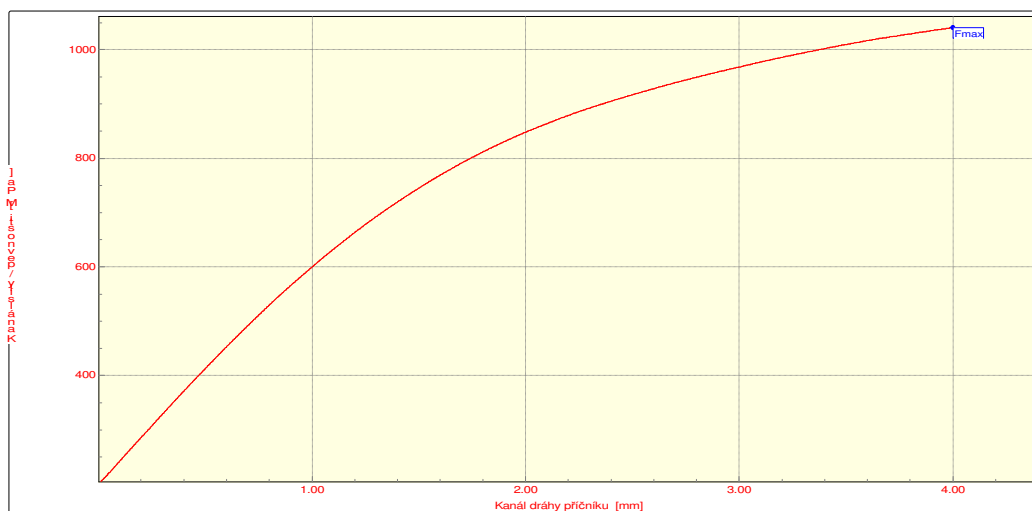
### VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: : TIPPLEN K199 -nově  
Norma: : ČSN EN ISO 527-1  
Rozměr vzorku: : (4x10) mm  
Rychlost zatěžování: : 20mm/min  
Vypracoval: : Ing. Lenka Frajtová  
Datum zkoušky: : 27.5.2009  
Směr odebrání vzorku : ---

### VÝSTUPNÍ HODNOTY

Číslo zkoušky	$R_m$ MPa	$F_{max}$ N
1	26	1041
2	26	1042
3	26,3	1051
4	25,7	1030
5	25,3	1015
6	25,6	1027
7	25,1	1006
8	24,8	995

Statistická hodnota	$R_m$ MPa	$F_{max}$ N
Počet zkoušek	8	8
Průměrná hodnota	25,6	1026
Směrodatná odchylka	0,51	19,29

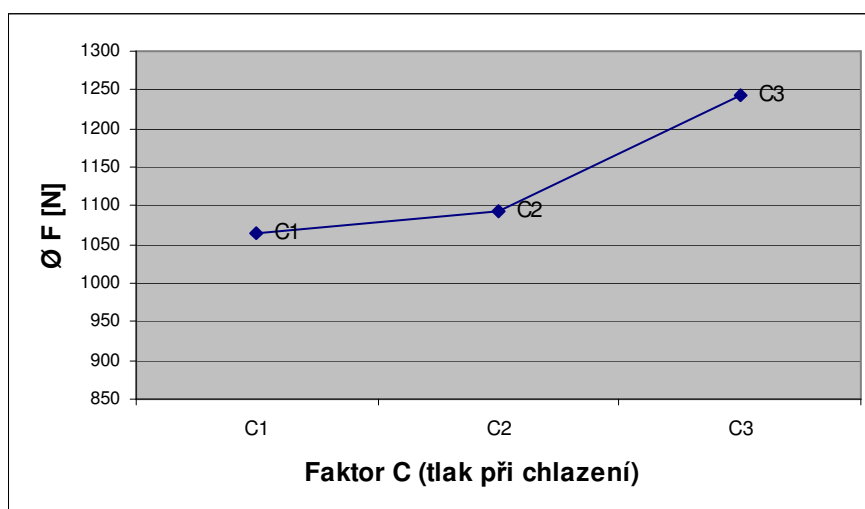
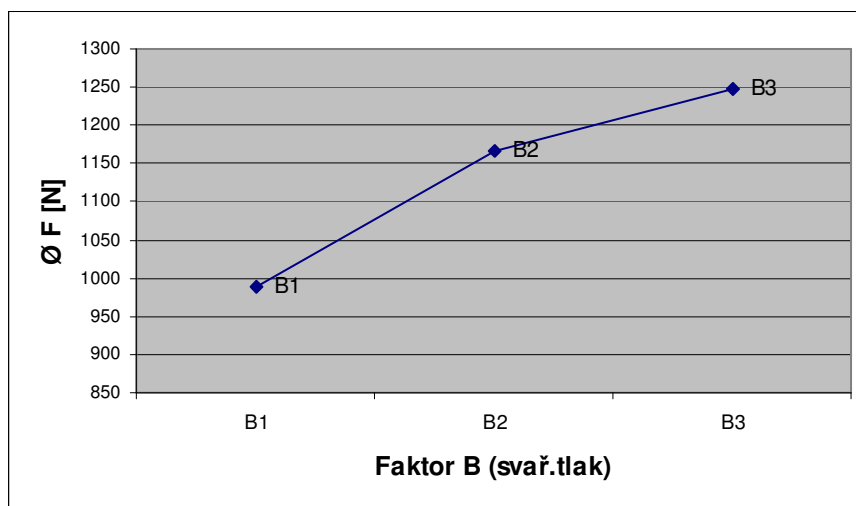
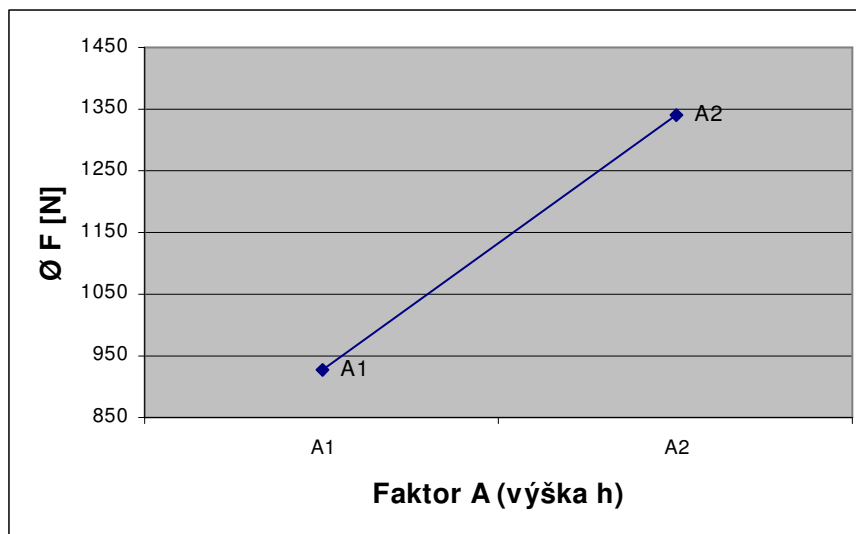


TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Katedra strojírenské technologie  
Oddělení tváření kovů a plastů

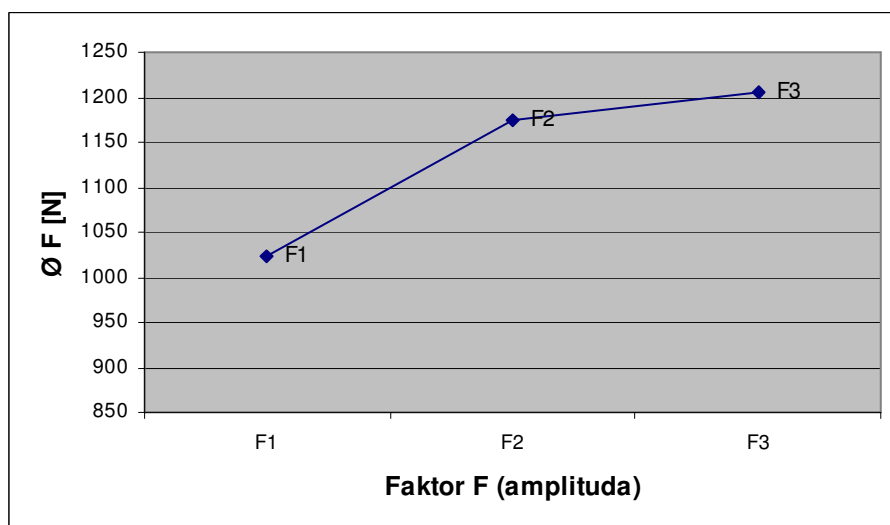
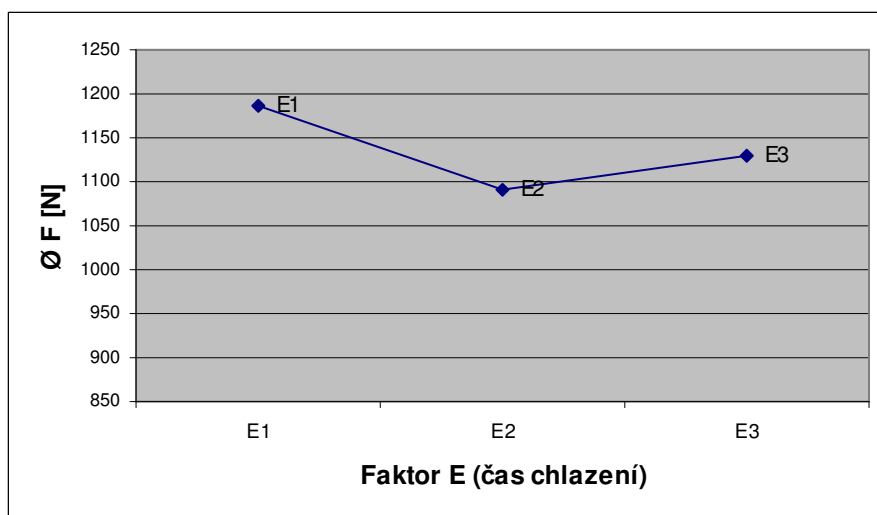
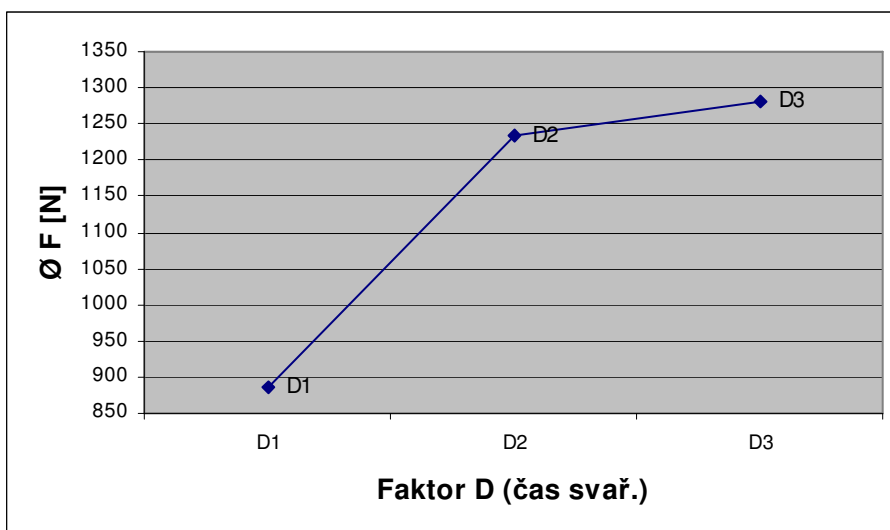


**Příloha 4 str. 1/9** Vliv proměnných faktorů na ultrazvukové svařování pro **Celstran +PP-GF45**



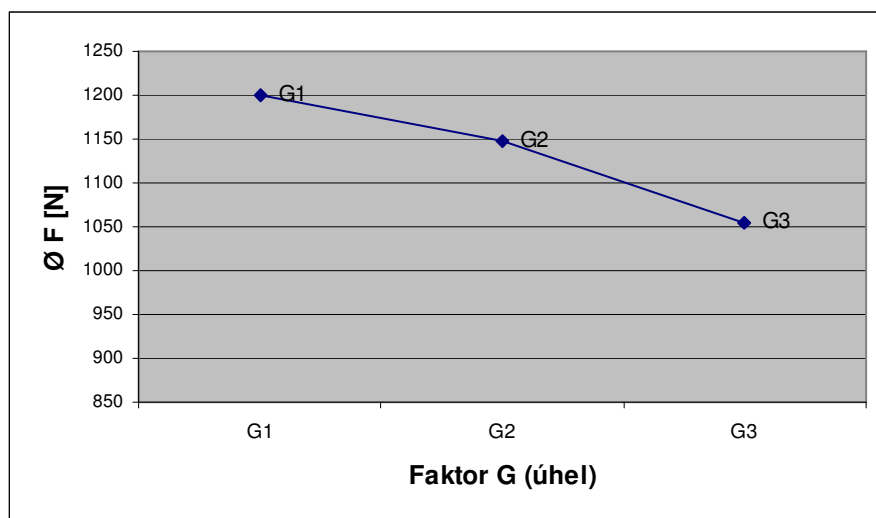


**Příloha 4 str. 2/9** Vliv proměnných faktorů na ultrazvukové svařování pro **Celstran +PP-GF45**



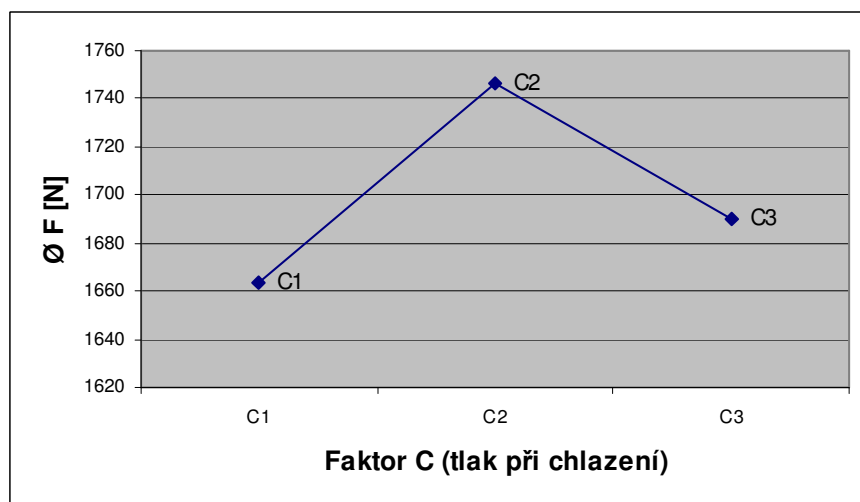
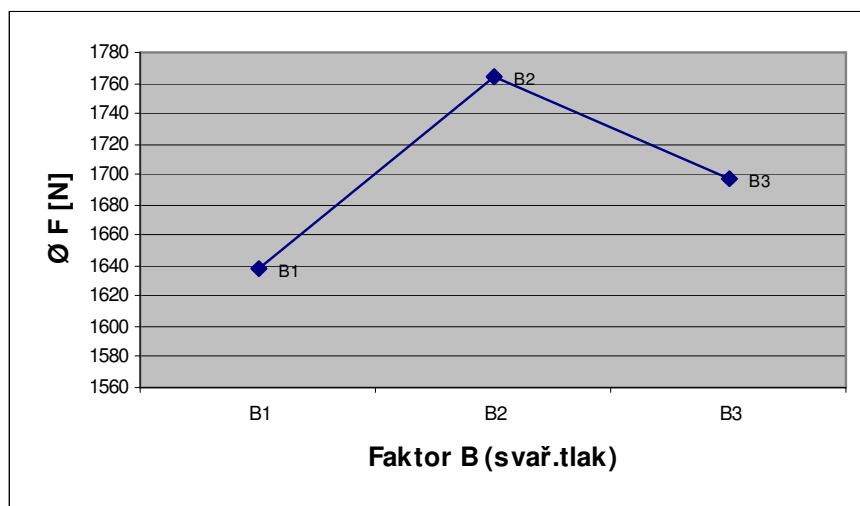
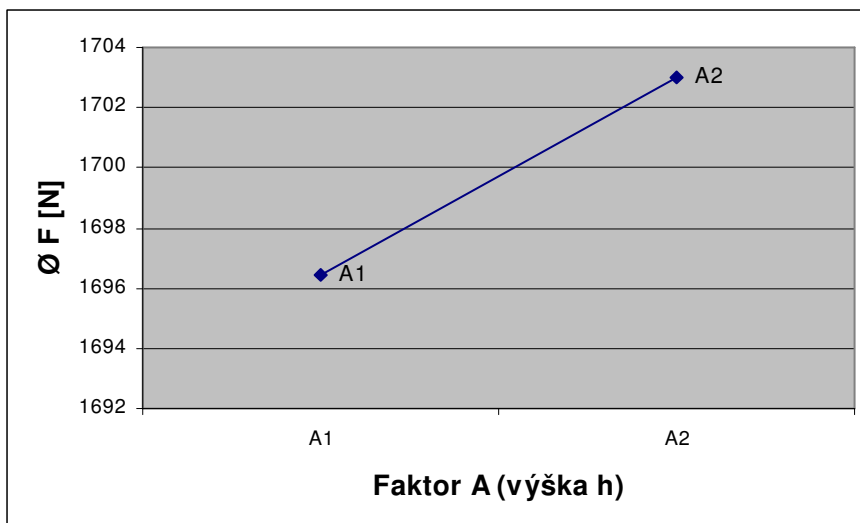


**Příloha 4 str. 3/9**    Vliv proměnných faktorů na ultrazvukové svařování pro **Celstran +PP-GF45**



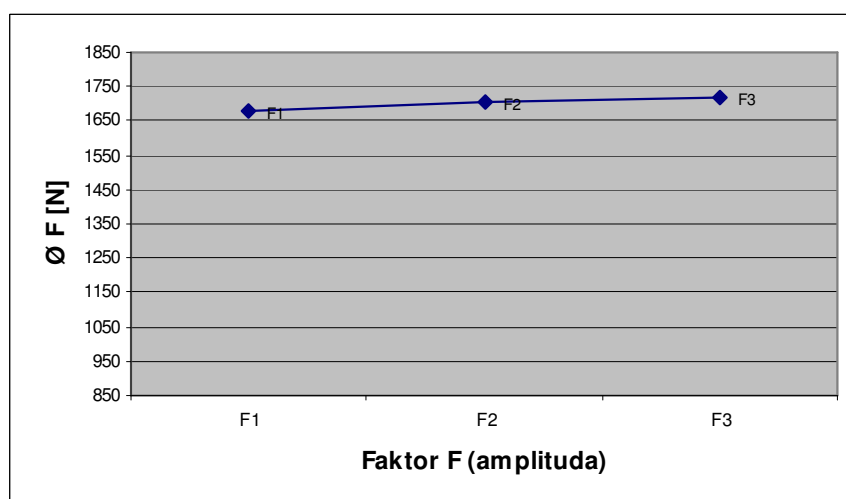
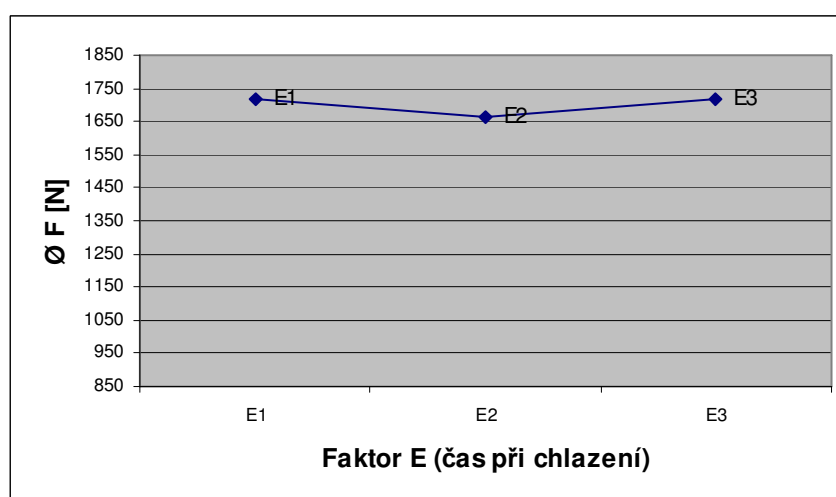
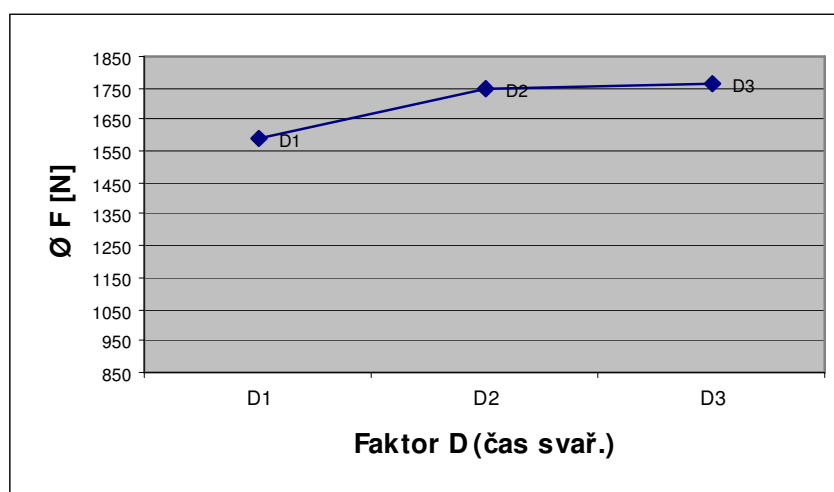


**Příloha 4 str. 4/9** Vliv proměnných faktorů na ultrazvukové svařování pro **Celstran +PP-GF30**



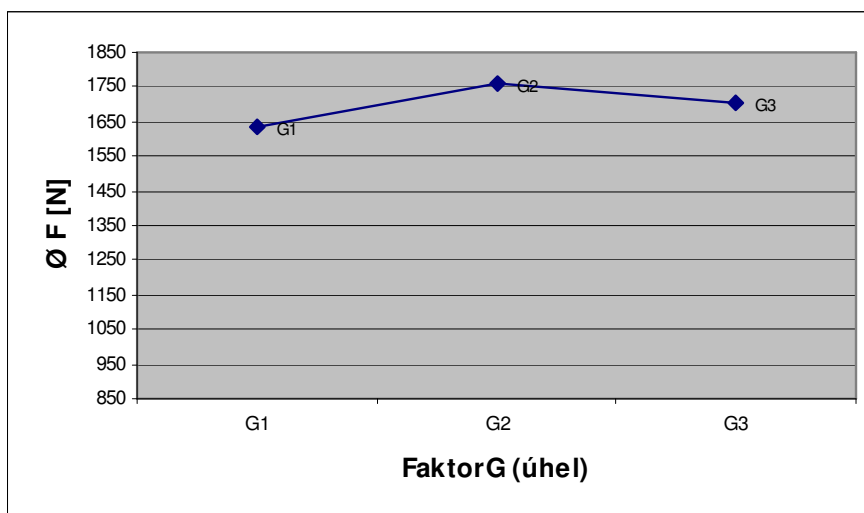


**Příloha 4 str. 5/9** Vliv proměnných faktorů na ultrazvukové svařování pro **Celstran +PP-GF30**





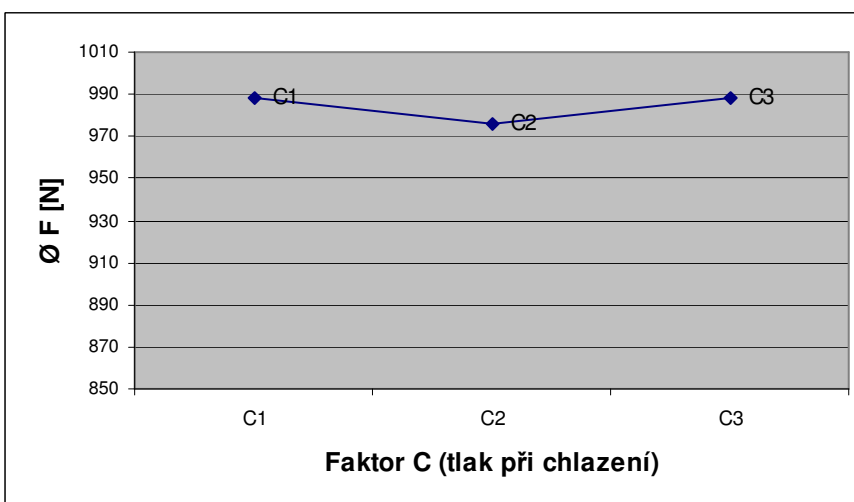
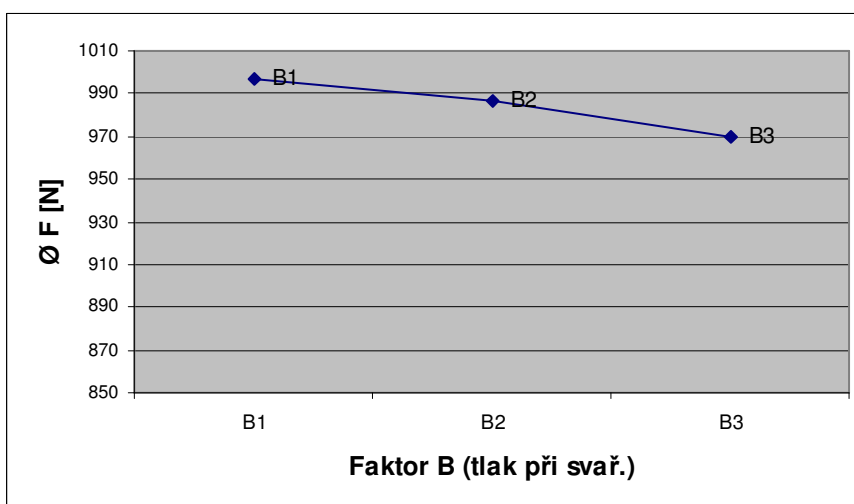
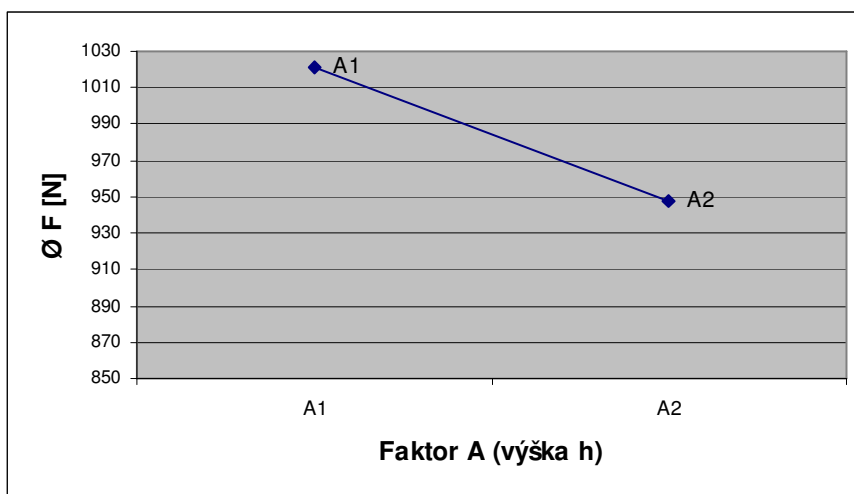
**Příloha 4 str. 6/9** Vliv proměnných faktorů na ultrazvukové svařování pro **Celstran +PP-GF30**





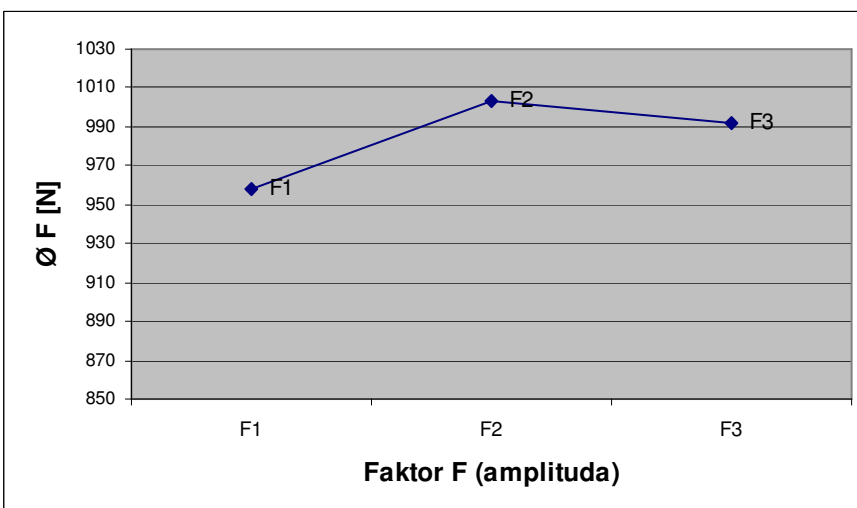
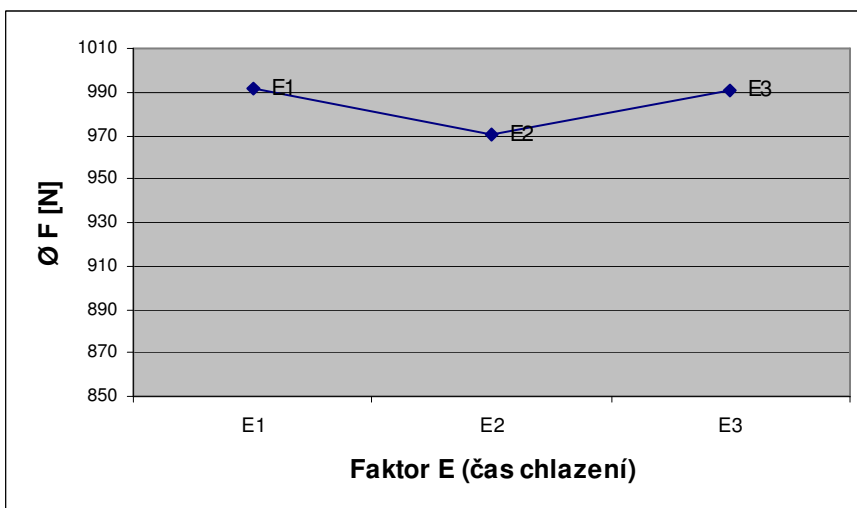
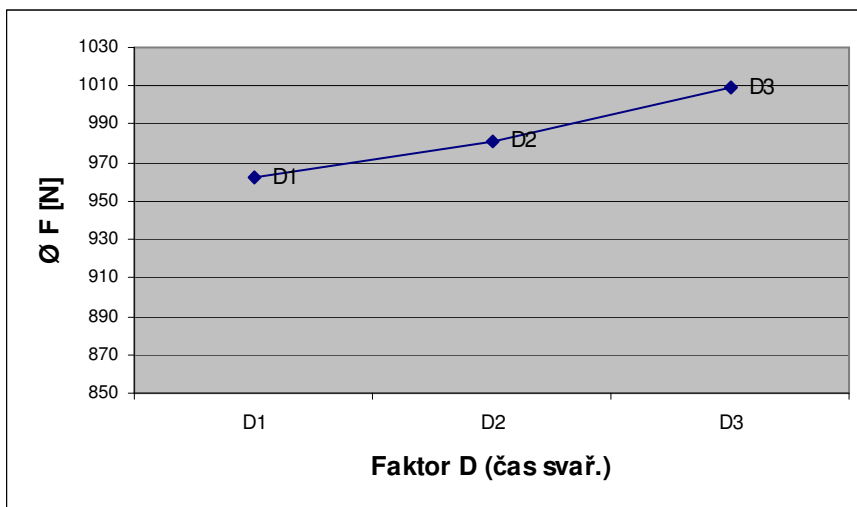


**Příloha 4 str. 7/9**    Vliv proměnných faktorů na ultrazvukové svařování pro **Tipplen K 199**



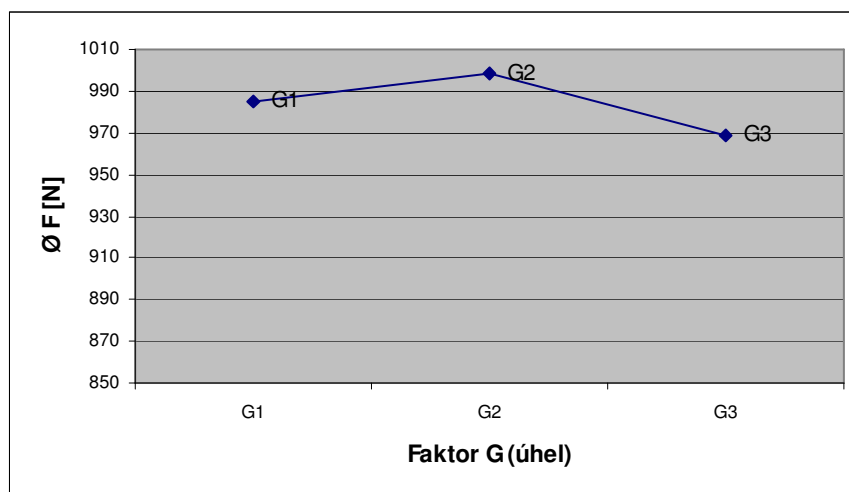


**Příloha 4 str. 8/9**    Vliv proměnných faktorů na ultrazvukové svařování pro **Tipplen K 199**



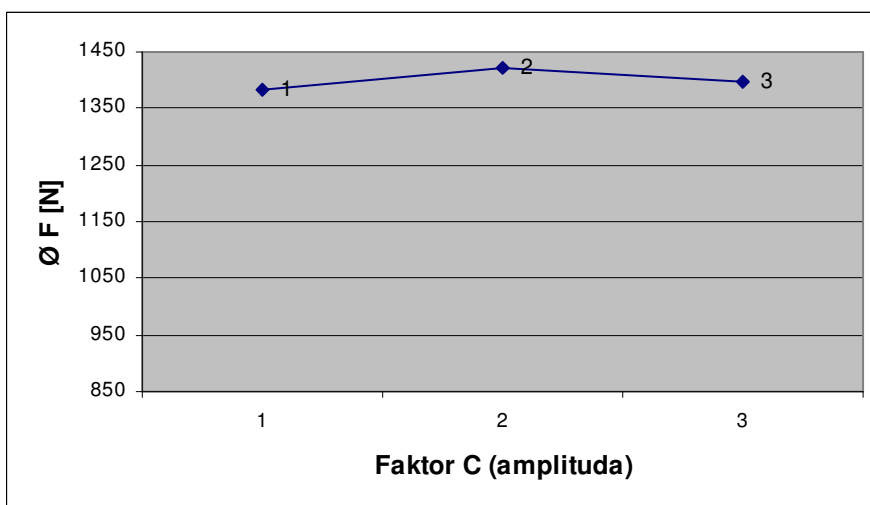
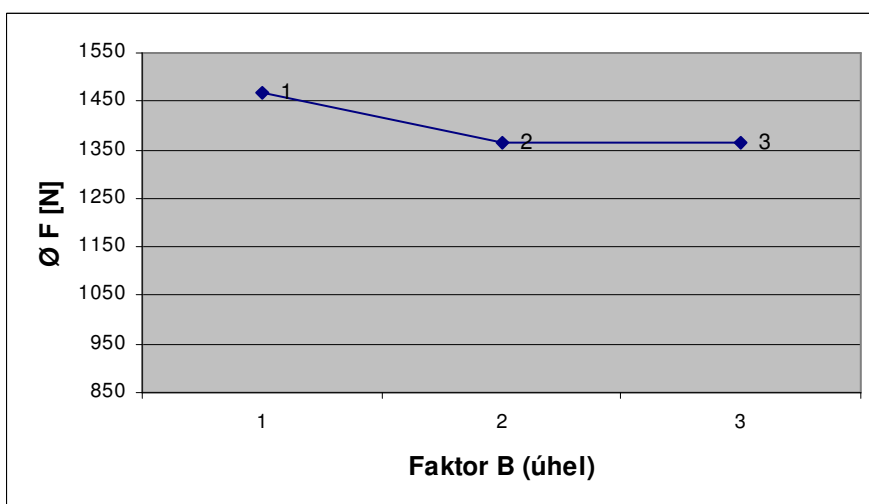
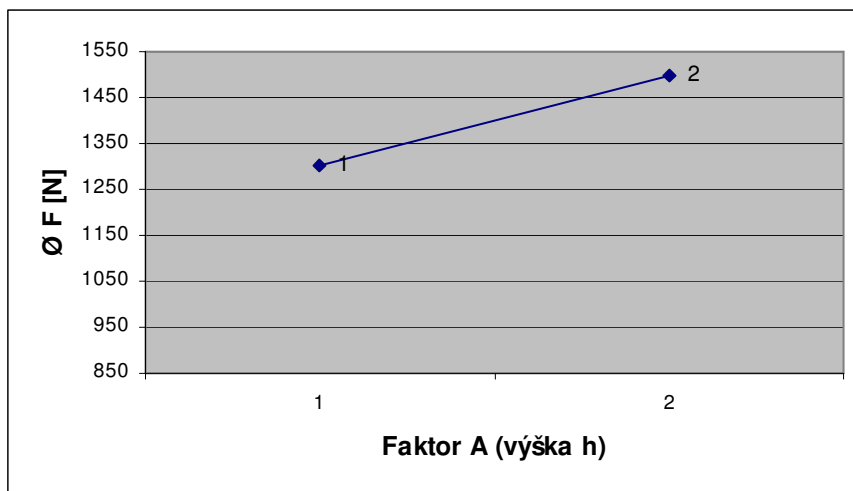


**Příloha 4 str. 9/9**    Vliv proměnných faktorů na ultrazvukové svařování pro **Tipplen K 199**



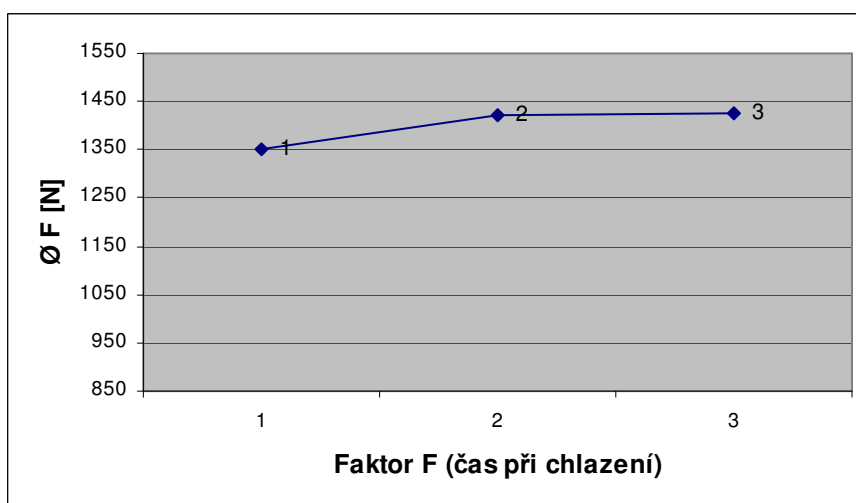
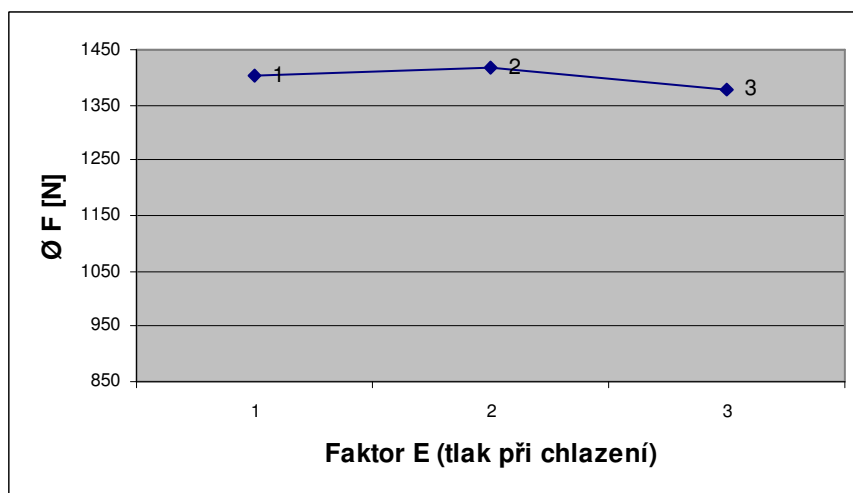
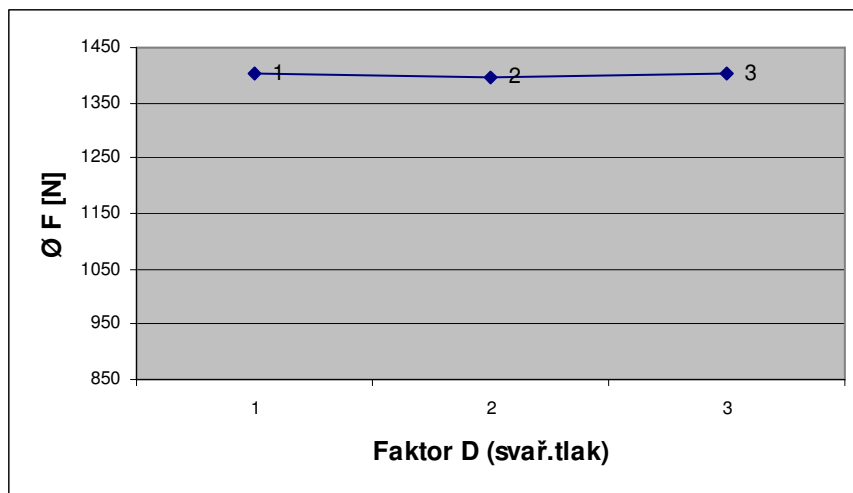


**Příloha 5 str. 1/2** Vliv proměnných faktorů na ultrazvukové svařování pro **Celstran +PP-GF45**, svařovaný podle absolutní vzdálenosti



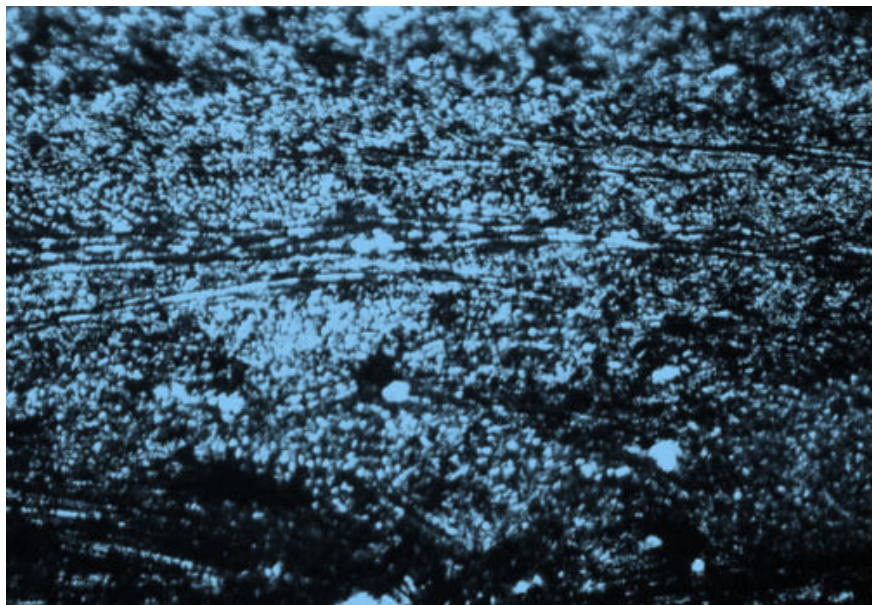


**Příloha 5 str. 2/2** Vliv proměnných faktorů na ultrazvukové svařování pro **Celstran +PP-GF45**, svařovaný podle absolutní vzdálenosti

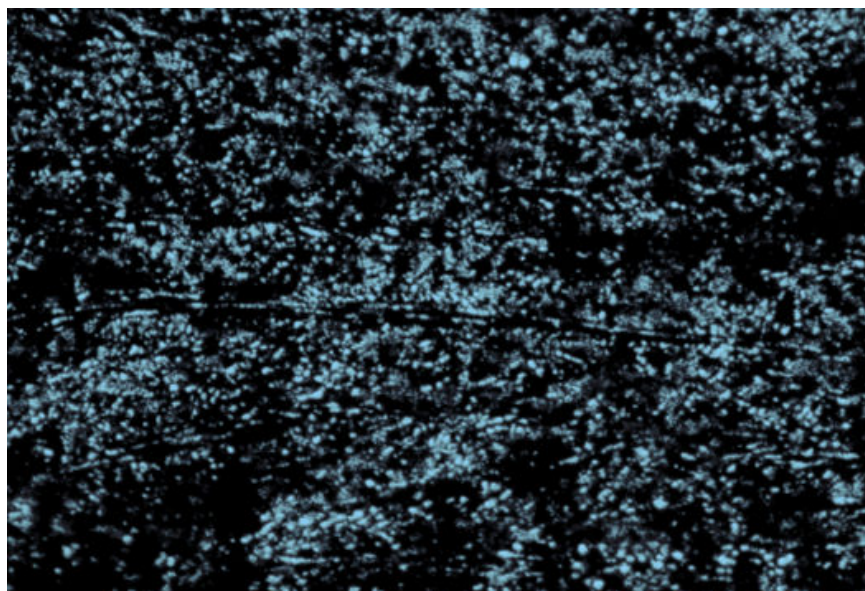


**Příloha 6 str.1/2**

**Struktury řezů**



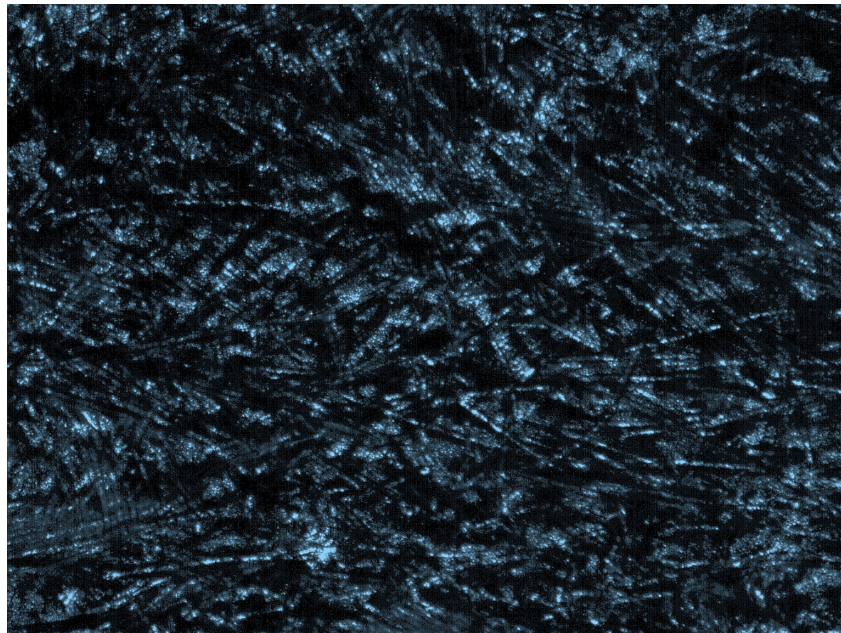
*Řez svarového spoje pro Celstran+PP-GF45 při novém nastavení svařovacích parametrů dle Taguchiho metody (kap.5.5.2), kde průměrná  $F_{max}$  dosahovala 1787 N, zvětšeno 36x na optickém mikroskopu.*



*Řez svarového spoje pro Celstran+PP-GF45 při nastavení svařovacích parametrů exp.č.8, kde průměrná síla  $F_{max}$  dosahovala 572N. Místo svaru není dokonale provařeno, výška usměrňovače energie byla nedostatečná  $h = 0,5\text{mm}$ , zvětšeno 36x na optickém mikroskopu.*

**Příloha 6 str.2/2**

**Struktury řezů**



*Struktura zkušebního vzorku vyrobeného z Celstran+PP-GF20, který nebyl v experimentech použit z důvodu nedostatečné plastikace. Na obrázku je patrné velké množství chaoticky rozložených skelných vláken, zvětšeno 36x na optickém mikroskopu.*



## **Prohlášení**

Byla jsem seznámena s tím, že na mou disertační práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé disertační práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li disertační práci nebo poskytnu licenci k jejímu využití, jsem si vědoma povinnosti informovat o této skutečnosti TUL, v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Disertační práci jsem vypracovala samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací.

## **Declaration**

I have been notified of the fact that Copyright Act No. 121/2000 Coll. applies to my dissertation in full, in particular Section 60, School Work.

I am fully aware that the Technical University of Liberec is not interfering in my copyright by using my dissertation for internal purposes of TUL.

If I use my dissertation or grant a licence for its use, I am aware of the fact that I must inform TUL of this fact; in this case TUL has the right to seek that I pay the expenses invested in the creation of my dissertation to the full amount.

I compiled the dissertation on my own with the use of the acknowledged sources and on the basis of consultation.

Datum / Date :

Podpis / Signature :